

**FACTORES FÍSICOS Y DE DISEÑO QUE INTERVIENEN EN LA EFICIENCIA DE LOS PANELES
SOLARES CONSTRUIDOS CON NUEVOS MATERIALES FOTOVOLTAICOS**

ORIANA NOGUERA SALAS

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D.C.
2017**

**FACTORES FÍSICOS Y DE DISEÑO QUE INTERVIENEN EN LA EFICIENCIA DE LOS PANELES
SOLARES CONSTRUIDOS CON NUEVOS MATERIALES FOTOVOLTAICOS**

ORIANA NOGUERA SALAS

SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN FOTÓN

TUTOR(ES):

**ING. RICARDO ALFONSO PINTO GARCÍA
ING. JHON EDISSON VILLARREAL PADILLA**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D.C.
2017**

Nota de aceptación:

Firma Jurado

Firma Jurado

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1 MARCO REFERENCIAL	11
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	11
1.2 MARCO CONCEPTUAL Y TECNOLÓGICO	13
1.2.1 La luz.....	13
1.2.1.1 Radiación	13
1.2.1.2 Radiación Electromagnética	15
1.2.1.3 Espectro electromagnético	15
1.2.1.4 Irradiancia.....	17
1.2.2 Radiación solar sobre el globo terráqueo	18
1.2.2.1 Radiación solar fuera de la atmósfera.....	20
1.2.2.2 Mapa de radiación solar colombiano	22
1.2.3 Efecto ambiental	24
1.2.3.1 Efecto Invernadero	24
1.2.3.2 Geotermia.....	25
1.2.3.3 Tecnología hidroeléctrica	26
1.2.4 La tecnología fotoeléctrica.....	26
1.2.4.1 El efecto fotovoltaico	26
1.2.4.2 Generación de celdas fotovoltaicas	29
1.2.4.3 Células fotoeléctricas	30
1.2.4.4 Eficiencia de las células fotoeléctricas	31
1.2.5 Nuevos materiales para las celdas solares.....	33
1.2.6 Caracterización de materiales fotosensibles	34
1.2.7 Nanotecnología en las celdas solares	36
2 ESQUEMA TEMÁTICO	38
2.1 PARÁMETROS FÍSICOS EN MATERIALES FOTOSENSIBLES ACTUALES	38
2.1.1 Parámetros físicos	38
2.1.1.1 Flexibilidad.....	38

2.1.1.2	Pureza	38
2.1.1.3	Toxicidad.....	39
2.1.1.4	Conductividad.....	39
2.1.1.5	Temperatura.....	40
2.1.2	Cuadro comparativo entre materiales fotosensibles actuales	41
2.1.2.1	Propiedades del silicio	41
2.1.2.2	Propiedades del grafeno	42
2.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE NUEVOS MATERIALES FOTOSENSIBLES Y ASPECTOS ESTRUCTURALES	43
2.2.1	Cuadro comparativo de nuevos materiales fotosensibles.....	44
2.2.1.1	Propiedades del dióxido de titanio	44
2.2.1.2	Propiedades del cobre.....	44
2.2.1.3	Propiedades del perovskita	45
2.2.2	Aspectos estructurales.....	46
2.3	CONDICIONES GEOGRÁFICAS, TOPOGRÁFICAS Y AMBIENTALES PARA EL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE INSTALACIÓN ELECTRICA	49
2.3.1	Condiciones atmosféricas	49
2.3.2	Simulación	50
2.3.2.1	PVSOL Expert 6.0	50
2.3.3	Datos experimentales generales.....	51
2.3.3.1	Datos experimentales panel monocristalino	56
2.3.3.2	Datos experimentales panel policristalino.....	60
2.3.3.3	Datos experimentales panel cobre	63
2.4	ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ÁREA DE LAS TELECOMUNICACIONES	66
2.4.1	Repetidor de microondas <i>back to back</i>	66
2.4.1.1	Ejemplo de simulación con una antena	68
2.4.1.2	Ejemplo de simulación con dos antenas	74
2.4.2	Estaciones base BTS	79
3	CONCLUSIONES.....	81

BIBLIOGRAFÍA.....	83
-------------------	----

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Características de la Luz	13
Figura 2. Emisión espontánea de radiación	14
Figura 3. Penetración de las radiaciones	14
Figura 4. Comportamiento de Ondas Electromagnéticas	15
Figura 5. Espectro Electromagnético	16
Figura 6. Separación Longitudes de Onda	16
Figura 7. Incidencia de la Radiación Solar por Estaciones	19
Figura 8. Elevación Solar	19
Figura 9. Variación de Medición Irradiancia Solar	21
Figura 10. Movimiento Aparente del Sol	21
Figura 11. Declinación Solar	22
Figura 12. Mapa de Radiación Solar Global Anual	23
Figura 13. Experimentación fotovoltaica	27
Figura 14. Efecto Fotoeléctrico	29
Figura 15. Energía vs Momento	30
Figura 16. Esquema Balance Detallado	32
Figura 17. Estructura de las células solares	47
Figura 18. Parámetros requeridos para el diseño estructural	48
Figura 19. Configuración modelo de panel	52
Figura 20. Datos climaticos	53
Figura 21. Formato de adición de aparatos electrónicos	54
Figura 22. Listado de aparatos eléctricos del simulador	55
Figura 23. Características del panel monocristalino	56
Figura 24. Datos característicos de temperatura en el panel monocristalino	57
Figura 25. Energía eléctrica producida anualmente	58
Figura 26. Simulación de panel solar	59
Figura 27. Características del panel policristalino	60
Figura 28. Datos característicos de temperatura en el panel policristalino	61
Figura 29. Energía eléctrica producida anualmente	62
Figura 30. Características del panel cobre	63
Figura 31. Datos característicos de temperatura en el panel cobre	64
Figura 32. Energía eléctrica producida anualmente	65
Figura 33. Simulación de panel solar	66
Figura 34. Repetidor de microondas activo	67
Figura 35. Repetidores de microondas pasivos	68
Figura 36. Listado de aparatos eléctricos del simulador (una antena)	69

Figura 37. Energía eléctrica producida anualmente	70
Figura 38. Simulación de panel solar monocristalino	70
Figura 39. Energía eléctrica producida anualmente	72
Figura 40. Energía eléctrica producida anualmente	73
Figura 41. Simulación de panel solar cobre	74
Figura 42. Energía eléctrica producida anualmente	75
Figura 43. Simulación de panel solar monocristalino	76
Figura 44. Energía eléctrica producida anualmente	77
Figura 45. Energía eléctrica producida anualmente	78
Figura 46. Simulación de panel solar cobre	79
Figura 47. Consumo energético diario de una BTS	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Uso de centrales eléctricas geotérmicas.....	25
Tabla 2. Tabla comparativa entre materiales fotosensibles actuales.....	43
Tabla 3. Tabla comparativa entre nuevos materiales fotosensibles	45
Tabla 4. Datos topográficos de Bogotá	50
Tabla 5. Datos uso eléctrico promedio en una vivienda estrato medio - alto.....	51
Tabla 6. Datos uso eléctrico repetidor de microondas back to back con una antena	68
Tabla 7. Datos uso eléctrico repetidor de microondas back to back con dos antenas	74

INTRODUCCIÓN

La energía solar ha sido usada desde remotos tiempos para labores domésticas, agrícolas y de transporte. Pero, fue a partir del descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 por Edmond Becquerel lo que llevó posteriormente a otros investigadores como Charles Fritts en 1893 a construir la primera célula solar real fabricada con láminas revestidas con selenio y una fina capa de oro que según la historia obtuvo una eficiencia cercana al 1%. En 1954 investigadores de laboratorios Bell, Fuller y Pearson lograron fabricar la primera celda solar de silicio, la cual alcanzó una eficiencia del 6%.

En 1958 se usaron celdas solares en el primer satélite de telecomunicaciones norteamericano, lo que dio un impulso al desarrollo y lanzamiento de satélites geoestacionarios en los que además se hizo uso de dispositivos de captación de luz solar y que en conjunto estimularon la investigación para lograr mejoras en la eficiencia de los paneles solares. En 1961 William Shockley y Hans Queisser definieron que el límite teórico de la eficiencia de celdas solares en mono-unión podría ser hasta del 30%. Científicos de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) en 1970 crearon la primera célula solar con estructura de arseniuro de galio (GaAs) con mejores desempeños, los cuales fueron luego confirmados en 1984 por los científicos Tiedje, Yablonovitch y Brooks quienes descubrieron que la eficiencia en una celda solar de silicio podría ser de hasta el 29.8%¹.

Con el nacimiento del siglo XXI creció el interés por la protección del ambiente y de reducir los efectos del calentamiento global, y con ello ha habido un auge en el uso masivo de este tipo de dispositivos, aplicados inclusive en el ámbito del hogar con el fin de reducir costos y disminuir el consumo de energía eléctrica convencional que se ha visto es una de las causantes del deterioro ambiental.

El uso de las celdas y paneles solares está relacionado directamente con la eficiencia de las mismas, y este ha sido uno de los problemas para el desarrollo y masificación. La eficiencia de una celda solar (η) es el parámetro que indica cuanta energía eléctrica puede producir en relación con la cantidad de radiación solar recibida por metro cuadrado y cuya unidad es el vatio por metro cuadrado de área (W/m^2). Actualmente los paneles que utilizan silicio amorfo o cristalino, tienen una eficiencia del 6% y del 14% respectivamente, pero existen paneles con multicapas de arseniuro de galio (GaAs) con una eficiencia de hasta 30%².

¹ MIRANDA M., Daniel A. 2009. Breve Descripción de las Celdas Fotovoltaicas de Mono Unión y de Banda Intermedia . *Universidad Industrial de Santander*. [En línea] 23 de Noviembre de 2009. http://ciencias.uis.edu.co/fisica/sites/default/files/blog/archivos/La%20celda%20fotovoltaica_v1.1.pdf.

² SOLAR, M. 2010. Energía Solar Fotovoltaica. *Reciclaje Paneles Solares*. [En línea] 1 de Abril de 2010. <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/comienza-el-reciclaje-de-paneles-solares-en-europ/>.

1 MARCO REFERENCIAL

Los siguientes apartes enmarcan las teorías bajo las cuales se desarrolló el trabajo de investigación, teniendo como punto de partida el estado del arte sobre las investigaciones que han abordado el tema principal de este trabajo.

1.1 ESTADO DEL ARTE

La fabricación de celdas fotovoltaicas siempre han buscado mejorar su eficiencia y en la llamada tercera generación fotovoltaica se ha centrado la atención en el uso de materiales y dispositivos capaces de alcanzar los niveles de eficiencia de las celdas de una banda prohibida, los cuales teóricamente se encuentran entre el 30% y el 40.7%. Para lograrlo se han probado dispositivos con múltiples bandas prohibidas e intermedias y modificación del espectro y uso del exceso de generación térmica para la mejora del voltaje de los portadores³.

En el 2003 el físico Juan Luis Peña Chapa realizó un trabajo de investigación y desarrollo relacionados con la creación de celdas solares de segunda generación (llamadas CdS/CdTe) fabricadas con telurio de cadmio, las cuales proporcionaron el 10% de eficiencia. Con ayuda de un grupo de investigadores italianos de la Universidad de Parma, se crea un laboratorio de celdas con una eficiencia del 14.6%. Sin embargo, estos paneles son de 1 a 4 cm², y lo que se busca con esta investigación es la creación de paneles de 10 cm² para la comercialización del mismo a nivel mundial⁴.

En el 2007 en Argentina se realizó un estudio para mejorar la potencia proporcionada por paneles solares usados en satélites de comunicaciones, mediante el uso de semiconductores III-V y de celdas con material ATJ (*Advanced Triple Junction*) que esperan tengan eficiencias cercanas al 40%. En esta misma línea en Italia se realizó una investigación conjunta entre el Grupo Energía Solar (GES) y el Instituto IMEM del CRN (*Consiglio Nazionales delle Ricerche*), con el fin de profundizar en el conocimiento de la utilización de los materiales II-V, para lograr aprovechar al máximo la eficiencia que ofrecen⁵.

En el 2009, el Laboratorio Nacional de Idaho (USA), reveló una nueva variedad de colectores solares que ofrecen un alto nivel de eficiencia de tal alcance que pueden

³ MERCADO, S.A. 2007. El medio ambiente, geotermia y toma de conciencia. 2007, pág. 77.

⁴ TORRES, Isaac. 2012. Científicos del Cinvestav crean las celdas solares más eficientes en AL. Crónica. 2012.

⁵ PLÁ, J., y otros. 2007. Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales III-V. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Argentina : s.n., 2007, págs. 04-85.

funcionar incluso durante la noche. Mediante el uso de nanotecnología implementaron micro-antenas conformadas por millones de fibras metálicas pequeñas montadas sobre plástico, que al resonar e interactuar con los rayos ultravioletas del sol, generaban energía. Como la tierra absorbe gran cantidad de energía durante el día la cual es irradiada a la atmosfera durante la noche, las micro-antenas pueden seguir recibiendo esta energía durante la noche y de esta forma los investigadores esperan que un panel solar con este tipo de material pueda convertir el 80% de luz solar en energía eléctrica⁶.

El 22 de mayo del 2010 el IES Fraunhofer (*Institute for Solar Energy Research*) comunicó el resultado de una investigación conjunta a la empresa Francesa Soitec, con relación a células solares multi-unión, las cuales tienen una eficiencia de hasta 50% bajo luz solar. Esta investigación se basa en reemplazar células solares de triple unión por un dispositivo de cuatro conexiones. Esta investigación emplea la tecnología de unión de oblea, y gracias a esto, se han obtenido células solares de 43% de rendimiento. En IES Fraunhofer se optimizaron más de 30 capas de material semiconductor para obtener la célula de cuádruple unión⁷.

El 3 de Marzo de 2014, Fei Yu estudiante de la Universidad de Cincinnati presentó un aumento del rendimiento y eficiencia en células solares haciendo uso de pequeñas fracciones de Grafeno, además de disminuir costos. Gracias a que el Grafeno es carbono puro, su capacidad de conductividad es muy alta. Esta investigación encontró que la eficiencia se triplicó añadiendo Grafeno ya que este ayudaba a transportar de forma más rápida la carga para lograr la fotocorriente⁸.

En el 2015 Ingenieros de Stanford crearon un material para recubrir células solares permitiendo así aumentos en su eficiencia. Investigaciones recientes demostraron que el calor es un factor que afecta de forma negativa las placas solares: a mayor calor, menor eficiencia. El recubrimiento indicado se fabricó a base de silicio en capas muy delgadas y totalmente transparentes colocadas sobre la célula, logrando que además de dejar pasar la luz solar, capturara y actuara como radiador del calor, desviando la radiación térmica y logrando así que la temperatura del panel disminuyera hasta 23°F; la eficiencia de las células aumentó en 1%⁹.

⁶ ENERGIASOLAR.MX. 2009. Uso de nanotecnología promete aumentar la eficiencia en Celdas Solares. *Energía Solar*. [En línea] 2009. <http://www.energiasolar.mx/desarrollo-tecnologico/uso-nanotecnologia-promete-aumentar-eficiencia-celdas-solares.html>.

⁷ FERMOSELL, Ruth. 2013. Avanza la investigación en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, llegando a alcanzar un 43% de eficiencia. Madrid: s.n., 2013.

⁸ FULLER, Dawn. 2014. UC Researchers Report on Discovery to Make Solar Power Less Expensive and More Efficient. UC News. 2014.

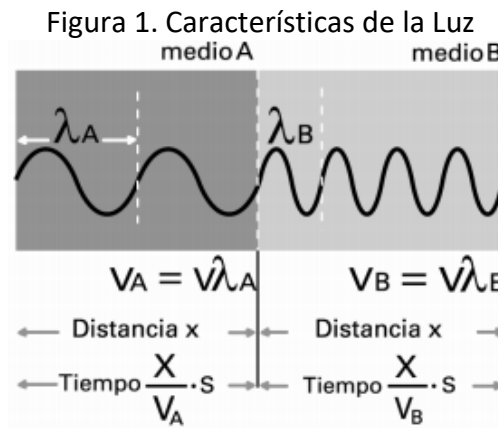
⁹ MOYA, Pedro. 2015. Paneles Solares. Crean un recubrimiento transparente que aumenta la eficiencia de los paneles solares. [En línea] 22 de Septiembre de 2015. [Citado el: 08 de Octubre de 2016.] <http://www.omicrono.com/2015/09/crean-un-recubrimiento-transparente-que-aumenta-la-eficiencia-de-los-paneles-solares/>

1.2 MARCO CONCEPTUAL Y TECNOLÓGICO

1.2.1 La luz

Se entiende como radiación electromagnética, posee la capacidad de estimular la retina del ojo humano lo cual produce la sensación visual. Las ondas electromagnéticas existen debido a los siguientes efectos: el campo magnético variable, el cual genera un campo eléctrico y un campo eléctrico variable, el cual genera un campo magnético.

La luz se irradia mediante una fuente, bien sea el sol, lámparas, flash, entre otros; puede ser desplazado en el vacío a gran velocidad (300.000 km/s aprox.), atravesar sustancias transparentes, esto, reduciendo su velocidad en función de la densidad. Puede propagarse en línea recta en forma de ondas perpendiculares en direcciones de desplazamiento.



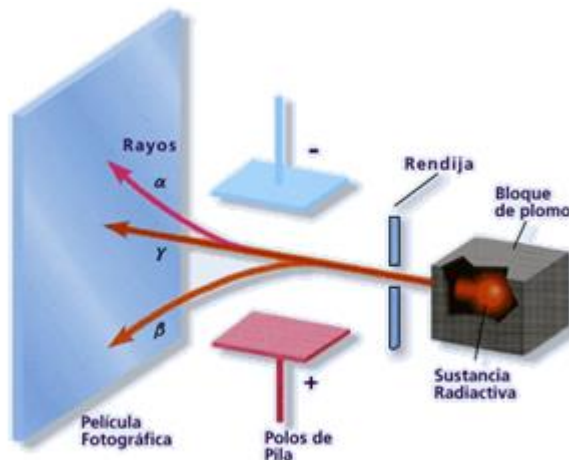
Fuente: SIRLIN, Eli. 2005. Diseño de Iluminación. Física de la Luz. [En línea] 2005. [Citado el: 16 de Junio de 2016.] http://www.elisirlin.com.ar/11_fisica%20de%20la%20luz.pdf.

Existen una serie de parámetros con los cuales se puede caracterizar la luz, como se ve en la Figura 1 están la amplitud (altura); longitud de onda (λ); velocidad, es decir, la distancia que recorre la onda en un segundo; frecuencia, es decir, el número de ondas que pasa en un segundo por un mismo punto. Debido a que la luz se transmite por el vacío, posee diferentes longitudes de onda y frecuencias, al momento de cambiar de medio cambia su velocidad y su longitud de onda.

1.2.1.1 Radiación

En 1896 Henri Becquerel un mineral que contenía uranio, el cual podía producir imágenes en películas fotográficas, en total ausencia de luz. A esto, atribuyo el fenómeno de emisión espontanea de radiación. Así ya se tenía conocimiento de 3 tipos de radiación: rayos gamma γ , partículas beta β , y partículas alfa α .

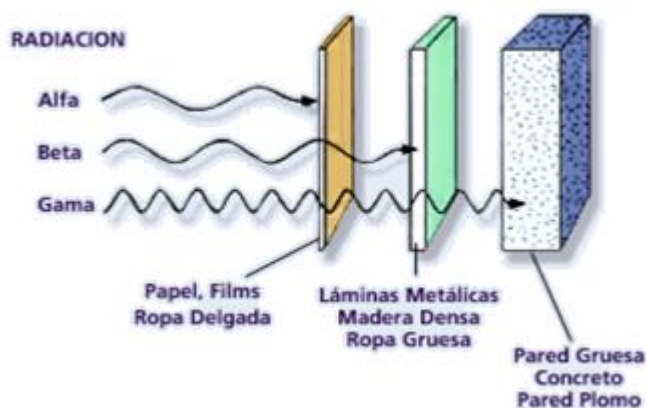
Figura 2. Emisión espontánea de radiación



Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 10 de Octubre de 2016.]

Se realizaron estudios de estas nuevas partículas en el campo eléctrico y magnético, como se observa en la Figura 2, este experimento reveló que las 3 radiaciones (γ , β , α) diferían en cuanto a sus propiedades eléctricas y de penetración. Es decir, las partículas α son derivadas por la presencia de la placa eléctrica hacia el polo negativo (-); las partículas β se derivan al polo positivo (+), similares a un electrón; los rayos γ no se vieron afectados por los campos externos. La radiación β , es un haz de electrones provenientes del núcleo del átomo. Los rayos α , son partículas cargadas positivamente. Los rayos γ , no transportan carga, no poseen masa medible, son de alta energía y su movimiento se asemeja a los rayos X.

Figura 3. Penetración de las radiaciones



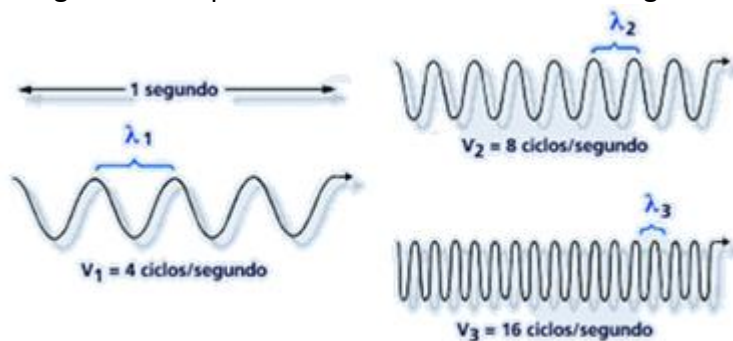
Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 10 de Octubre de 2016.]

Como se observa en la Figura 3, los rayos α son de baja penetrabilidad ya que son detenidos al tener contacto con una hoja de papel. Los rayos β son alrededor de 100 veces más penetrantes y los rayos γ son 1000 veces más penetrantes.

1.2.1.2 Radiación Electromagnética

Se entiende como el medio por el cual se transporta la luz solar. Posee un comportamiento de ondas y una velocidad continua (velocidad de la luz = $2,9979 \times 10^8$ m/s), las ondas son descritas mediante 3 características: longitud de onda (λ), frecuencia (f) y velocidad (c), como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Comportamiento de Ondas Electromagnéticas



Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 10 de Octubre de 2016.]

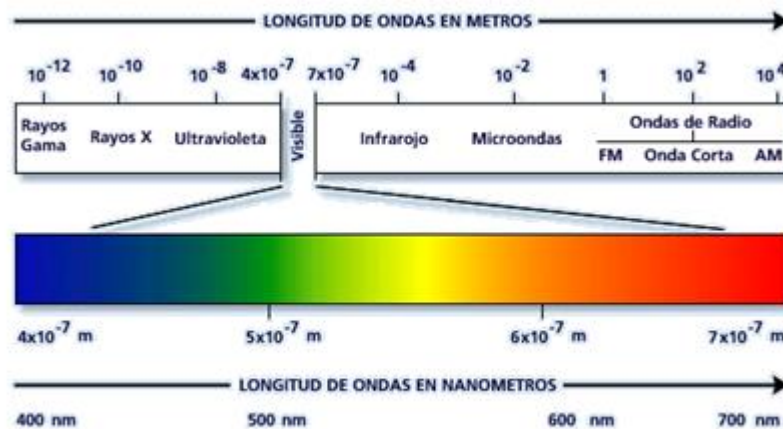
Generalmente, la longitud de onda mide la distancia entre 2 máximos, sin embargo, el número de veces que se repita el máximo de la onda por segundo corresponde a la frecuencia. Mientras más alto sea el número, la onda de más alta frecuencia es más energética. Por otro lado, la onda de más baja frecuencia, es más suave. Estas 3 variables se relacionan de la siguiente manera:

$$f\left(\frac{1}{s}\right) * \lambda(m) = c\left(\frac{m}{s}\right) = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

1.2.1.3 Espectro electromagnético

Se conoce como la distribución energética de un conjunto de ondas electromagnéticas. Como se observa en la Figura 5, este espectro se extiende desde la radiación de menor longitud de onda (rayos cósmicos, rayos gamma y rayos X) pasando por la radiación de mediana longitud de onda (radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja) hasta las ondas de mayor longitud de onda (ondas de radio).

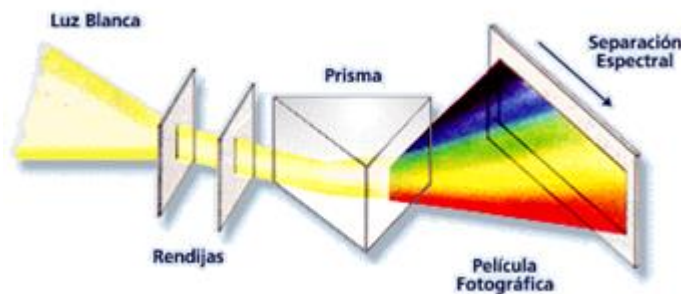
Figura 5. Espectro Electromagnético



Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 10 de Octubre de 2016.]

Por otro lado, la radiación no llega en forma de “Luz Blanca”, es decir, al obtener todas las tonalidades juntas crea un efecto lumínico que da la ilusión del blanco y la separación de colores se da mediante prismas o cristales naturales, como se muestra en la Figura 6. Este efecto se denomina “descomposición espectral”. La radiación de distintas longitudes de ondas afecta a la materia dependiente de su valor. Por ejemplo, una exposición prolongada del cuerpo humano a la radiación infrarroja generará quemaduras por calor, en cambio, una exposición prolongada a radiación visible o ultravioleta producirá un color “tostado” a causa del sol, sin embargo, una exposición prolongada a rayos X producirá un daño profundo en los tejidos (cáncer de piel).

Figura 6. Separación Longitudes de Onda



Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 10 de Octubre de 2016.]

Dado que este espectro cubre longitudes de ondas muy variadas, por ejemplo, frecuencias de 30Hz o cercanas a $2,9 \times 10^{27}$ Hz. La energía electromagnética en una longitud de onda particular (el vacío) tiene una frecuencia (f) asociada y una energía de fotón (E). Por lo tanto, puede expresarse haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$c = f * \lambda, \text{ lo que es lo mismo que } \lambda = \frac{c}{f} \quad (2a)$$

$$E = h * f, \text{ lo que es lo mismo que } E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2b)$$

Donde,

c , es la velocidad de la luz (299,792,458 m/s).

h , es la constante de Planck ($h \approx 6,626060 \times 10^{-34} \text{ Js} \approx 4,13567 \mu\text{eV/GHz}$).

Por tanto, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía, mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía.

1.2.1.4 Irradiancia

Se entiende por la magnitud que describe la potencia incidente por unidad en una superficie de radiación electromagnética.

$$I = \frac{P_{inc}}{A_s} \quad (3)$$

Donde,

P_{inc} , es la potencia incidente.

A_s , es el área de la superficie sobre la que incide la onda.

En relación al electromagnetismo, la irradiancia es el valor de intensidad energética promedio de onda electromagnética en un punto dado, y es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$I = \langle S \rangle_T \quad (4)$$

Donde,

$\langle S \rangle_T$, valor promedio del vector Poynting.

Vector poynting: representa la intensidad instantánea de la energía electromagnética, la cual fluye a través de área a la dirección de propagación de onda, se define con el símbolo S . Puede ser definido como el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético, es decir:

$$\bar{S} = \bar{E} \times \bar{H} = \frac{1}{\mu} \bar{E} \times \bar{B} \quad (5)$$

Donde,

\bar{E} , representa el campo eléctrico.

\bar{H} , es la intensidad del campo magnético.

\bar{B} , es el campo de inducción magnética.

μ , es la permeabilidad del medio.

La irradiancia se emplea de base en relación a las magnitudes físicas similares, entre las cuales la radiancia (energía emitida por unidad de superficie vs unidad de ángulo sólido) es mayormente utilizada. También se emplea para definir constantes solares, por ejemplo, la cantidad de energía solar que llega a la atmósfera de la Tierra por unidad de superficie y tiempo. Tiene 3 valores diferentes: 1367 W/m² según WEEC (*World Radiation Reference Centre*), 1373 W/m² WMO (*Organización Mundial de Meteorología*) y, 1353 W/m² según la NASA (*Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio*)¹⁰.

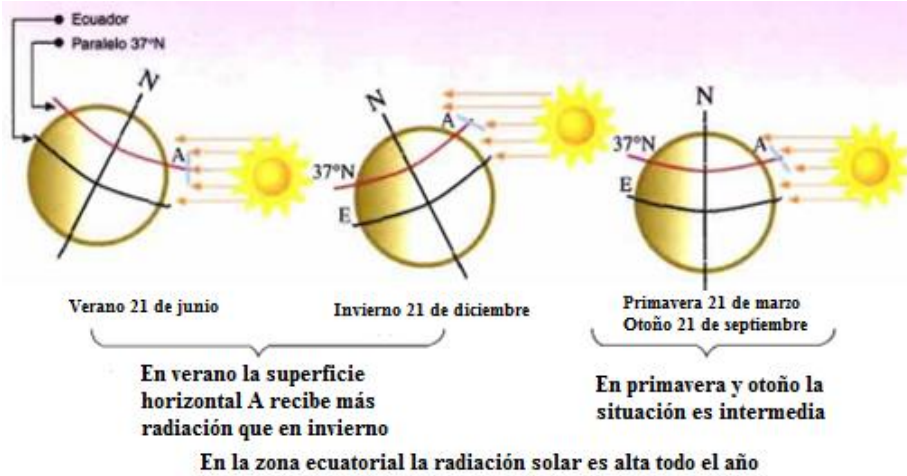
1.2.2 Radiación solar sobre el globo terráqueo

Al hablar de radiación solar, existen dos tipos: la radiación directa, es decir, la que se da en línea recta y la radiación difusa, o la que proviene de diferentes direcciones a causa de las nubes y turbidez atmosférica, la cual ayuda a aumentar la radiación irradiada en comparación con la radiación directa, etc.; la suma de estas dos radiaciones crea la radiación global. Por ejemplo, en un día soleado, es más pronunciada la radiación directa siempre y cuando la elevación del sol sea superior a los 37°, de lo contrario será más pronunciada la radiación difusa.

Existen otros componentes de la radiación solar, la radiación infrarroja (con longitud de onda mayor que la del espectro visible pero de menor energía), la cual da gran parte de energía y la radiación ultravioleta (con longitud de onda menor que la del espectro visible y con mayor energía) relacionada principalmente al envejecimiento de los materiales. Bajo la radiación solar directa, los cuerpos son capaces de proyectar una sombra, la cual se va moviendo conforme va cambiando el ángulo solar, lo que no ocurre con la radiación difusa.

¹⁰ RENOM, Madeleine. 2011. Radiación. Principios básicos de mediciones atmosféricas. 2011.

Figura 7. Incidencia de la Radiación Solar por Estaciones

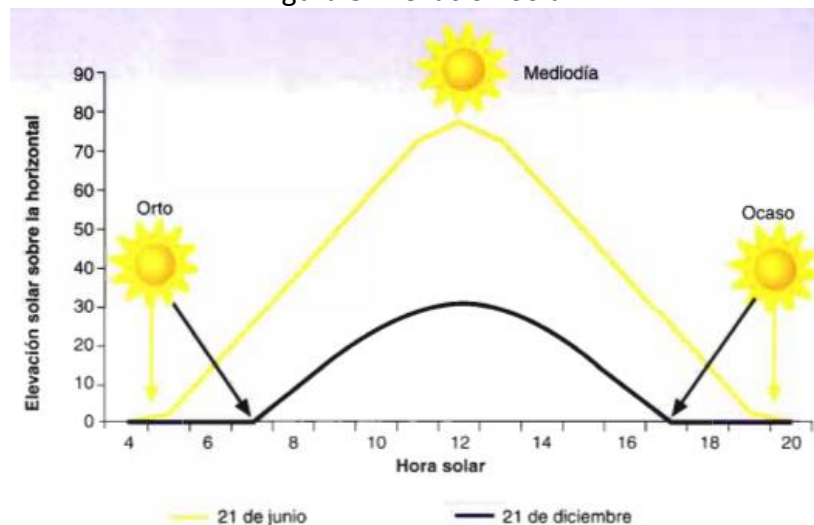


Fuente:

http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_2001_157_18_27.pdf
[Citado el: 12 de Junio de 2015]

Como se puede observar en la Figura 7, la cantidad de energía solar que incide sobre la superficie terrestre depende principalmente el ángulo de inclinación de los rayos solares; mientras más perpendiculares sean, mayor será la intensidad, esta perpendicularidad depende de la posición geográfica de la región, es decir, la latitud, y de la época del año y la hora del día.

Figura 8. Elevación Solar



Fuente:

http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_2001_157_18_27.pdf
[Citado el: 04 de Agosto de 2016]

De igual forma, en la Figura 8 se ve que en el hemisferio norte y en fechas cercanas al 21 de diciembre, es decir, invierno la duración del Sol es de 9 horas y la elevación es de máximo 30° lo que indica una menor radiación solar sobre la superficie terrestre. Por otro lado, durante las fechas cercanas al 21 de junio, es decir, verano que la duración del sol será de aproximadamente 15 horas y con una elevación de máximo 78° lo que indica una mayor radiación solar sobre la superficie terrestre¹¹.

Existen dispositivos y sistemas que ayudan a evaluar la cantidad de radiación solar sobre las regiones terrestres, como son los satélites ambientales geoestacionarios que registran mediante imágenes tomadas cada cierto tiempo el estado de dicha energía sobre la tierra. Para lograrlo se han elaborado modelos físicos que permiten entregar datos más exactos de las lecturas térmicas en esas zonas del mundo. Así, en Francia se realizó un estudio para utilizar el modelo estadístico-físico Heliosat II, el cual se basó en el uso de imágenes satelitales para medir la irradiancia global diaria y mensual. Este modelo se financio por la Unión Europea desde 1996 hasta 1998, con el objetivo de crear una base de datos que ayudara a mejorar, desarrollar y validar modelos de irradiación solar a nivel de superficie terrestre¹².

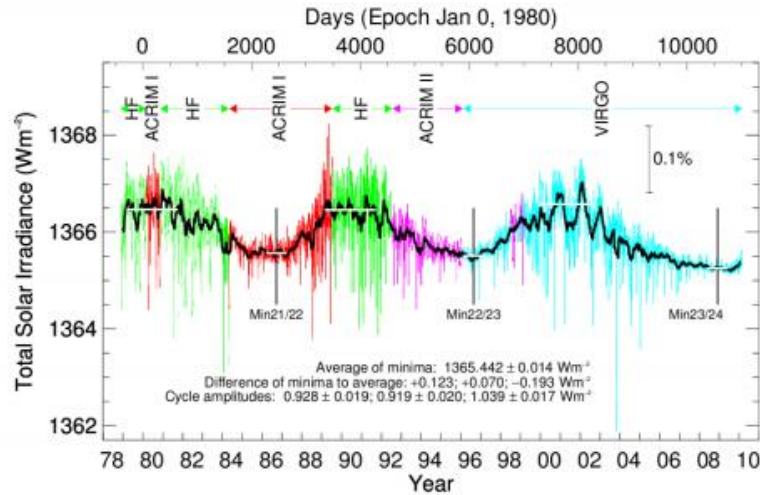
1.2.2.1 Radiación solar fuera de la atmósfera

Para esta radiación existe una variable referente a la irradiancia media incidente sobre una superficie normal en dirección Tierra-Sol la cual está ubicada en el exterior de la atmosfera a una distancia media tierra-sol conocida como Constante Solar (G_{sc}), este valor es determinado por mediciones satelitales de irradiancia espectral en el exterior de la atmosfera. En la Figura 9 se observa la variación de medidas de la irradiancia solar.

¹¹ J. Hernández, "La radiación solar en invernaderos mediterráneos," Tecnología de producción, pp. 18-22, 2001.

¹² J. Martínez P., *OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE*, Madrid, 2009.

Figura 9. Variación de Medición Irradiancia Solar



Fuente: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/54561/mod_resource/content/1/Curso-FES-Radiacion-solar-v2.3.pdf [Citado el: 12 de Octubre de 2016]

La irradiancia fuera de la atmósfera presenta una variación estacional de aproximadamente 3% con respecto a G_{sc} debido a la singularidad de la órbita terrestre. La Tierra se mueve siguiendo una órbita elíptica, y cuenta con una excentricidad (singularidad) $e = 0,0167$ el cual determina la variación estacional existe en relación a la distancia Tierra-Sol¹³.

El movimiento procedente del sol se debe a la variación del eje de rotación (eje polar) de la Tierra, como se observa en la Figura 10. La normal al plano orbital de la Tierra define una dirección espectral a la cual el eje polar forma un ángulo de $\pm 23,5^\circ$.

Figura 10. Movimiento Aparente del Sol



¹³ ABAL, Gonzalo. Fundamentos de Energía Solar RADIACIÓN SOLAR. págs. 3,4.

Fuente: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/54561/mod_resource/content/1/Curso-FES-Radiacion-solar-v2.3.pdf [Citado el: 12 de Octubre de 2016]

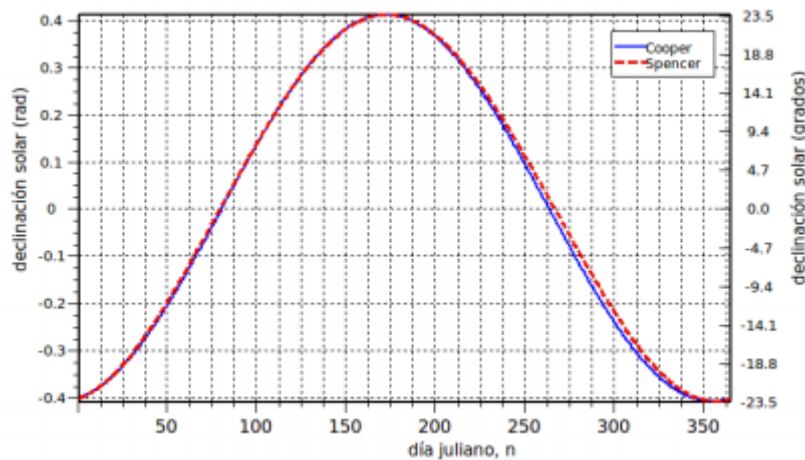
El ángulo que forma la línea Tierra-Sol con el plano ecuatorial cambia según como la tierra recorra su órbita, este ángulo se denota declinación solar δ es nulo en los equinoccios y alcanza su máximo ($\pm 23,5^\circ$) en los solsticios. Como se observa en la Figura 11, δ varía instantáneamente, diariamente el cambio es menor al 0.5° , por tal razón se asume que δ permanece constante durante las 24 horas periódicas y depende únicamente del ordinal día (n). La declinación solar puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\delta = \delta_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (6)$$

Donde,

$$\delta_0 = 23,45^\circ = 0,409 \text{ rad}$$

Figura 11. Declinación Solar

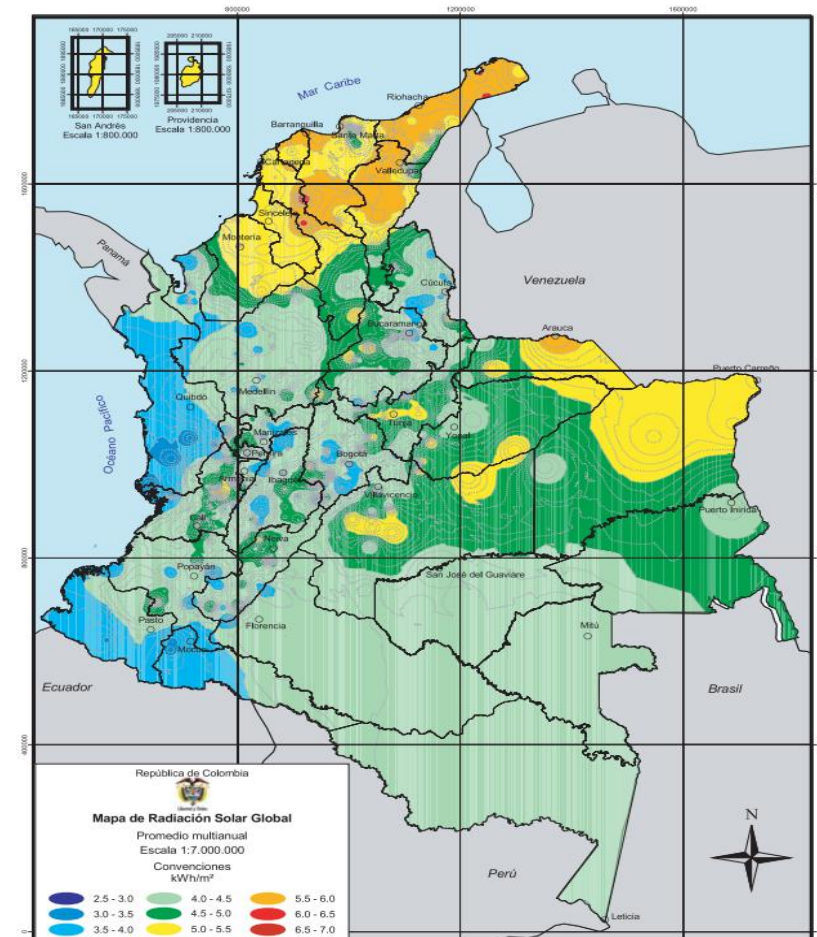


Fuente: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/54561/mod_resource/content/1/Curso-FES-Radiacion-solar-v2.3.pdf [Citado el: 12 de Octubre de 2016]

1.2.2.2 Mapa de radiación solar colombiano

A continuación se mostrara un mapa anual de la radiación solar incidente sobre Colombia, esto con el fin de determinar cuáles regiones adquieren un mayor nivel de radiación y en qué época del año es que ocurre este fenómeno.

Figura 12. Mapa de Radiación Solar Global Anual



Fuente: UPME. 2010. *Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana*. Bogotá: s.n., 2010. [Citado el: 09 de Febrero de 2016]

Como se ve en la Figura 12, se observan las conversiones de colores relacionadas a los rangos de radiación solar en Colombia medidas en kW/m^2 . Puede verse que los colores tienen un intervalo entre sí de 0.5, lo que indica que la zona central del país posee un nivel de radiación medio, de entre 4.5 a 5.0 kW/m^2 , mientras que la zona norte, desde Montería hasta Riohacha poseen un alto nivel de radiación entre 5.5 y 6.0 kW/m^2 . No obstante, la mayor parte del territorio colombiano se encuentra en un nivel medio-bajo de radiación solar, el cual se encuentra entre 4.0 y 4.5 kW/m^2 .

La región con mayor radiación solar en Colombia es la península de La Guajira, siendo el mes de julio el mes de mayor promedio de radiación (superior a 650 cal/cm^2 por día) y el mes de diciembre el de menor promedio de radiación (530 cal/cm^2 por día). En segundo lugar, la región Andina en el mes de febrero cuenta con niveles de radiación de 480 cal/cm^2 por día, los cuales en el mes de junio tienen un promedio de radiación 420 cal/cm^2 por día. Las zonas con niveles más bajos de radiación son la costa Pacífica y el piedemonte

llanero, con promedios menores a 300 cal/cm^2 por día, durante el año es poco lo que varían siendo marzo y abril los meses de mayor radiación, y noviembre y diciembre los de menor radiación.

1.2.3 Efecto ambiental

Con ayuda de la energía renovable se busca mejorar el deterioro ambiental, como el cambio climático, los residuos radioelétricos, lluvias ácidas, contaminación atmosférica, etc. Existen dos tipos de energías renovables, alternativas o blandas, se reconocen como tal la leña, centrales hidroeléctricas e incluso la geotermia. Actualmente suministran un 20% del consumo mundial, dando una mejora considerable a niveles de energía. Con la excepción de la geotermia, las energías renovables en su mayoría se derivan directa o indirectamente de la energía solar.

A lo largo de la historia, más específicamente, a principios del siglo XIX, han cubierto la mayoría de las necesidades energéticas del hombre. Fue a partir de 1950 que han venido siendo superadas por el petróleo y en menor medida por el gas natural. En el 2003 la energía nuclear con 441 centrales cubre una parte del consumo mundial teniendo una potencia de 360GW. Hoy en día, para más de 2000 millones de personas de países del Sur, la principal fuente de energía continua siendo la leña, sin embargo, se han venido presentado crisis debido a la deforestación¹⁴.

En la actualidad, el consumo de la energía renovable a nivel mundial se acerca al 8% donde el 6% pertenece a Europa, sin embargo, se ha ido concientizando de forma global debido a la dependencia energética en los países industrializados, el agotamiento y encarecimiento de recursos energéticos fósiles y los cambios climáticos. Muchos países se han visto con el objetivo de que en el 2020 se triplique el uso de las energías renovables, llegando al 20%; en Canarias España, aunque los recursos energéticos renovables son bastos, el uso de los mismos es muy bajo, esta situación se ve en muchos de los países ya que no hacen uso de los materiales energéticos que contribuyen al mejoramiento ambiental¹⁵.

1.2.3.1 Efecto Invernadero

Es un fenómeno atmosférico que tiene la función de mantener la temperatura del planeta reteniendo parte de la energía emitida por el sol debido a la capa de ozono presente en los niveles altos de la atmósfera terrestre que actúa como una cortina que retiene el calor. El deterioro de la capa de ozono causado por la concentración de dióxido de carbono (CO_2) como consecuencia del uso de combustibles fósiles y de otros gases (aerosoles, humos producto de quema de bosques, etc.) ha ido incrementando la temperatura global

¹⁴ SANTAMARTA, J. 2006. Las Energías Renovables son el Futuro. [En línea] 2006. <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/511.pdf>.

¹⁵ SCHALLENBERG, Julieta C. 2008. *Energías renovables y eficiencia energética*. s.l. : Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. , 2008.

(mayor calentamiento global), por lo que se han visto aumentos en océanos y derretimiento de los hielos polares, entre otros fenómenos¹⁶.

1.2.3.2 Geotermia

Es el calor de la corteza terrestre producido por la acumulación de energía bajo la superficie. Este tipo de energía actualmente es transformada en energía eléctrica (por el uso de fuentes de agua o vapor a altas temperaturas y presiones que expelen la tierra), o fuente de calor para uso industrial y agrícola. El calor contenido en los materiales del núcleo y el manto terrestre transmiten una onda constante de calor hacia la corteza; este nivel de calor aumenta aproximadamente 3 grados por cada 100 metros de profundidad lo cual es conocido como “gradiente geotérmico”; valores entre 2° y 5°C por cada 100 metros son considerados normales. La siguiente tabla muestra el uso que algunos países han dado a la energía geotérmica para la producción de energía eléctrica.

Tabla 1. Uso de centrales eléctricas geotérmicas

CENTRALES ELÉCTRICAS GEOTÉRMICAS Potencia instalada Mundial (MW)	
Estados Unidos	2.544
Filipinas	1.931
México	953
Indonesia	797
Italia	790
Japón	535
Nueva Zelanda	345
Islandia	202
Costa Rica	163
El Salvador	151
Kenya	127
Nicaragua	87
Rusia	79
Guatemala	33
China	28
Turquía	20
Portugal	17
Francia	15
Otros	20
TOTAL	8.927

Fuente: https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf
[Citado el: 20/01/2016]

¹⁶ Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde la ciencia de la tierra. Caballero, Margarita, Lozano, Socorro y Ortega, Beatriz. 2007. 10, México: s.n., 2007, Vol. 8.

La mayoría de los países han encontrado un beneficio ambiental y económico al hacer uso de la energía geotérmica, principalmente US y Filipinas como se puede ver en la Tabla 1, a pesar de que es una tecnología capaz de funcionar sin inconvenientes aún hay muchos países que no hacen uso de esta¹⁷.

1.2.3.3 Tecnología hidroeléctrica

La tecnología hidroeléctrica es la generación de electricidad generada mediante la energía del agua en movimiento. Emplea una maquinaria primaria la cual transforma el agua en energía mecánica y una maquinaria secundaria la cual la transforma en energía eléctrica. Esta tecnología depende del ciclo hidrológico de la lluvia, es decir, la evaporación solar, la cual ayuda a enviar grandes cantidades de agua a zonas elevadas alimentando los ríos. Esta tecnología es significativa en regiones donde hay abundancia de lluvias y desniveles geológicos; puede utilizarse para producir energía eléctrica por medio de saltos de agua. A pesar de ser una energía renovable, el impacto medioambiental creado por una alteración al paisaje y un cambio potencial en el clima ha hecho que esta energía haya reducido su uso¹⁸.

En relación a Colombia, las centrales hidroeléctricas generan el 65% de energía, está estimada en 93GW, con 25GW adicionales de centrales mini-hidráulicas. Actualmente, las hidroeléctricas presentan dificultades relacionadas al costo social, el medio ambiente relacionado con las grandes represas y el cambio climático que se ha ido presentando en el país los cuales pueden presentar periodos de sequía afectando el uso de esta tecnología.

1.2.4 La tecnología fotoeléctrica

1.2.4.1 El efecto fotovoltaico

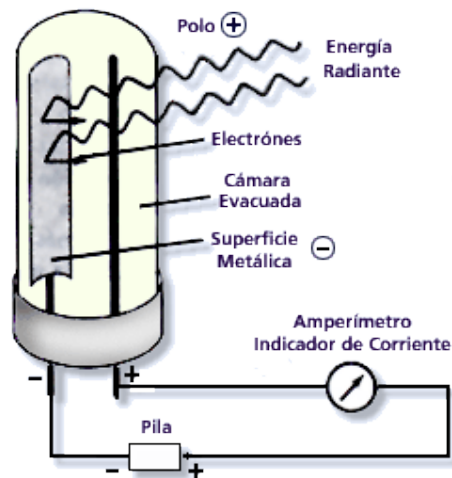
Se le conoce como la emisión de electrones por un metal al tener contacto con radiación solar. Este efecto fue descubierto en 1887 por H. Hertz, quien descubrió que si los electrones emitidos circulan por un circuito que mide la intensidad de corriente y a este se le añade una tensión considerable, la polaridad de este puede cambiar.

¹⁷ Energía geotérmica. Energías renovables. [En línea] [Citado el: 20 de Enero de 2016.]

https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf.

¹⁸ RESTREPO A., Luis Antonio. 2007. *La Energía Hidroeléctrica*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Medellín: s.n., 2007

Figura 13. Experimentación fotovoltaica



Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/ [Citado el: 23 de Septiembre de 2016.]

En la Figura 13, se muestra un experimento capaz de explicar el efecto fotoeléctrico haciendo uso de dos placas metálicas paralelas en una botella conectada a un amperímetro y a una batería con un potenciómetro el cual permite variar tanto potencia como el signo de las placas. Este experimento lo que hace es iluminar el cátodo, es decir, el emisor, y da como resultado una pequeña corriente en el amperímetro, lo que significa que hubo una transferencia de electrones de una placa a otra; luego, se varía la potencia de las placas para poder modificar la intensidad de corriente en el amperímetro; en el momento en que la potencia sea negativa (es decir, el movimiento de electrones sea opuesto) existirá un potencial de umbral V_0 para el cual la corriente cesará. Así mismo, al multiplicar el potencial con la carga de electrones se obtendrá la energía cinética máxima de los electrones fotoeléctricos. Según esto, la energía de los fotoelectrones es independiente a la intensidad de la luz.

Otra explicación de este fenómeno se puede dar mediante la siguiente explicación:

Los fotones tienen energía característica la cual se determina mediante la frecuencia de onda de la luz. Un átomo, al absorber energía del fotón y tener más energía de la necesaria para expulsar un electrón, al tiempo que posee la trayectoria dirigida a la superficie, el electrón puede expulsarse del material. Al contrario que, si la energía del fotón es pequeña, no es posible que el electrón sea expulsado. El cambio en la intensidad de la luz no afectan la energía de los fotones, lo que hace es alterar el número de electrones expulsados a la superficie, por lo tanto, la energía de los electrones emitidos no depende de la radiación entrante sino de la frecuencia.

Principalmente, los electrones son susceptibles a ser emitidos a causa del efecto fotoeléctrico, sin embargo, los que salen requieren menos energía para ser expulsados.

Tratándose de un aislante dieléctrico, los electrones con mayor energía se posicionan en la banda de valencia; en un metal, se posicionan en la banda de conducción; en un semiconductor tipo N, se toman principalmente los electrones de la banda de conducción y, los semiconductores tipo P, toman los electrones de ambas bandas.

Al estar a temperatura ambiente, los electrones con mayor energía se posicionan cerca del nivel de Fermi, en cuyo caso, la energía dada a un electrón se llama función de trabajo y, la frecuencia mínima necesaria de radiación incidente, es nombrado frecuencia umbral cuyo valor varía dependiendo del material. En el rayo solar, existen fotones, los cuales cuentan con una energía característica, la cual es definida como la frecuencia de luz. En la fotoemisión, si un electrón absorbe energía de un fotón que tenga más energía que función de trabajo, el electrón es expulsado del material. En un caso opuesto donde la energía es menor a la función de trabajo, el electrón no será expulsado.

Ahora bien, el aumentar la intensidad del haz de luz tendrá como resultado el incremento de fotones lo que ocasionara que la energía de los electrones emitidos no dependa de la intensidad de la luz sino de la energía de los fotones. Estos electrones siguen el siguiente principio: “...toda la energía de un fotón debe ser absorbida y utilizada para liberar un electrón de un enlace atómico, o sino la energía es reemitida”. Al ser absorbida la energía del fotón, una parte se encarga de liberar al electrón del átomo y la otra hace de energía cinética¹⁹. Si se quiere analizar el efecto fotoeléctrico, puede emplearse el método derivado por Einstein, el cual plantea lo siguiente:

Energía de un fotón absorbido = Energía necesaria para liberar un electrón + Energía cinética del electrón emitido, es decir,

$$h_f = hf_0 + \frac{1}{2}mv_m^2 \quad (7)$$

$$E_k = h \times f_0 - \Phi \quad (8)$$

Donde,

h , constante de Planck ($1,626 \times 10^{-34}$ J.s)

f_0 , frecuencia de corte (frecuencia mínima) de los fotones en Hz.

Φ , función de trabajo.

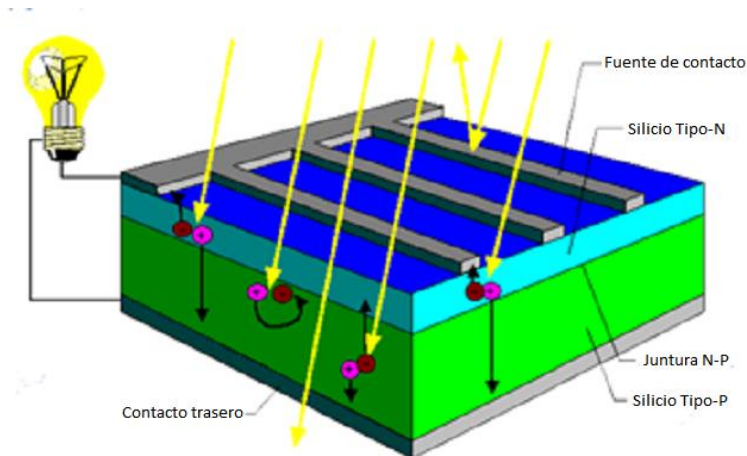
E_k , máxima energía cinética de los electrones.

Sí la energía del fotón (h_f) es mayor a la función de trabajo (Φ) ningún electrón será emitido, pero, si los fotones de radiación incidente son menores que la función de trabajo,

¹⁹ Energía Solar Fotovoltaica. 2009.

no serán capaces de obtener la energía suficiente para ser expulsados a la superficie del material.

Figura 14. Efecto Fotoeléctrico



Fuente: <http://cifes.gob.cl/otros/Generador%20fotovoltaico.pdf>. [Citado el: 17 de Noviembre de 2015]

Como se observa en la

Figura 14, los módulos son compuestos por celdas solares, en la cuales la radiación solar incide sobre la unión P-N del material semiconductor causando un bombeo de fotones entre el *frente de contacto* hasta el *contacto trasero*.

1.2.4.2 Generación de celdas fotovoltaicas

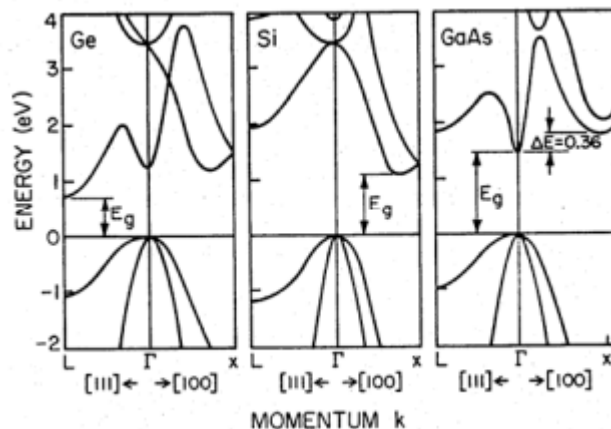
Para conocer cómo se crea una celda solar, primero se debe conocer qué es una celda solar y cómo funciona. Se entiende como un dispositivo capaz de transformar la energía solar en energía eléctrica haciendo uso de materiales semiconductores, los cuales cuentan con propiedades de conductividad y que además son capaces de generar corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas. En el momento en que los rayos del sol indican sobre el material semiconductor, los electrones de banda de valencia absorben energía fotónica y la pasan a la banda de conducción generando corriente eléctrica.

Las celdas solares cuentan con una estructura física en la cual la parte central es el material semiconductor, este material se puede dividir en tres grupos: cristal simple, policristalino y amorfo. El cristal simple se caracteriza por ser capaz de organizar cada cierto tiempo los átomos obtenidos de un paralelepípedo. Un material policristalino se compone por una serie de subsecciones con forma cristalina, estas subsecciones cuentan con una orientación independiente y normalmente se producen discontinuidades en este material. Finalmente, un material amorfo no tiene regularidad en su estructura, en la actualidad el 25% o 30% de las celdas solares se fabrican con materiales policristalinos, dado que son más económicos, sin embargo, cuentan con una eficiencia mínima y una alta

sensibilidad al cambio ambiental, por lo que generalmente se emplean en concentradores ópticos de luz.

De igual forma, hay que considerar como se produce el movimiento de electrones en el material semiconductor, por medio de la absorción de energía. Como se ve en la Figura 15, se tiene la diferencia de energías entre la energía de valencia y la conducción del material, a lo cual se le define como E_g (Band gap o banda prohibida). Esta banda se caracteriza por ser la cantidad de energía que requiere retirar un electrón del enlace covalente y convertirlo en parte del circuito eléctrico. Para la creación de una celda solar eficiente la clave es obtener fotones capaces de obtener una energía mayor a la de la banda prohibida ya que así podrán liberar un mayor número de electrones lo que dará como resultado una mayor conversión de luz solar en electricidad.²⁰

Figura 15. Energía vs Momento



Fuente: PEREDA, Isidro E. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Santiago, Chile: s.n., 2005.

1.2.4.3 Células fotoeléctricas

Con el pasar de los años, la producción de electricidad haciendo uso de células fotoeléctricas se ha ido haciendo más y más cara. En 1960 el instalar un vatio de células, ascendía a 2.000 dólares; en 1975 descendió a 30 dólares y en 2004 de 2.62 dólares a 4.25, dependiendo de la cantidad y el tipo de instalación. Hoy en día, Estados Unidos la producción de 1 kWh cuesta de 4 a 8 céntimos de dólar en una central de carbón, de 4 a 6 en parques eólicos y de 25 a 40 céntimos utilizando células fotovoltaicas²¹.

- **Celda solar Graetzel**

Este tipo de celdas son conocidas mayormente como celda solares basadas en Dióxido de Titanio (TiO_2) o célula de pigmento fotosensible, creada por el inventor Michael Greatzel

²⁰ PEREDA, Isidro E. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Santiago, Chile: s.n., 2005.

²¹ SANTAMARTA, J. 2006. Las Energías Renovables son el Futuro. [En línea] 2006.

<http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/511.pdf>.

en 1991. La invención de la celda fue a raíz del de un estudio realizado en la obtención que hacen las plantas de energía solar por medio de la clorofila. Tiene una estructura es de dos electrodos planos; uno de vidrio debido a su conductividad, y otro, nano-cristales de dióxido de titanio²². Emplea un principio foto-electroquímico de conversión de energía solar en energía eléctrica.

- **Celda Tándem**

Este tipo de celda es el resultado de la ampliación de dos células individuales, es decir, la combinación de dos células las cuales son absorbidas en el espectro al mismo tiempo, lo que ocasiona que se junten, mejorando así el rendimiento de las células. Gracias a la unión de estas, se amplifica la sensibilidad en un gran rango de longitud de onda y mejora el rendimiento, sin embargo, es de alto costo.

1.2.4.4 Eficiencia de las células fotoeléctricas

Es la magnitud expresada en porcentaje de la potencia total de luz solar que incide sobre una celda solar y que se transforma en energía eléctrica. Este término puede calcularse haciendo uso de la relación de la potencia máxima (P_m), sobre la irradiancia E (magnitud utilizada para describir la potencia de radiación solar incidente con un ángulo determinado sobre una unidad de superficie dada en W/m^2) bajo ciertas condiciones específicas (STC: *Standard Test Conditions*) y multiplicada por el área superficial de la celda (A_c) donde incide (dado en m^2)²³.

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{E \times A_c} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

P_m es la potencia máxima resultante en vatios.

E es la irradiancia de luz.

A_c es el área superficial.

STC: Los fabricantes de células y módulos solares especifican varios parámetros celulares. Estos valores se muestran en la parte trasera del módulo y se usan como un indicador de rendimiento típico. Según el IEC 60891 (IEC 60891: 2009 define los procedimientos que deben seguirse para la temperatura y la irradiancia en la medida de corriente-tensión, característica de los dispositivos fotovoltaicos) las condiciones específicas de los parámetros para establecer la eficiencia de las celdas solares, se obtienen en laboratorio con un simulador solar de $1000 W/m^2$, un trazador I-V y una célula de referencia calibrada a una temperatura de la célula de $25^\circ C$, un ángulo de inclinación de 42° para una masa de

²² CITED. 2012. *Celdas de Grätzel*. Medellín : s.n., 2012.

²³ G. Ferro, E. Lentini and C. Romero, "Eficiencia y su medición en prestadores de servicios de agua potable y alcantarillado," Febrero 2011. [Online]. Available: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/42728/lcw385e.pdf>.

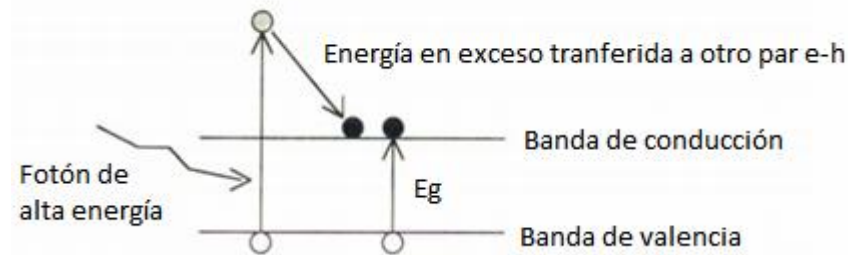
aire espectral (AM: *Air Mass*) de 1,5 (un AM igual a 1 representa el espesor estándar de la atmósfera atravesado perpendicularmente a la superficie terrestre, y medido a nivel del mar).

Para efectos de entender la ecuación de la eficiencia, se puede indicar que si se aplican las condiciones estándar de prueba indicadas anteriormente, en el que se tiene una celda de 500 cm^2 ($0,05 \text{ m}^2$) y una eficiencia de 16% (0,16), se tiene:

$$P_m = E \times A_c \times \eta = 1000 \times 0,05 \times 0,16 = 8 \text{ w} \quad (10)$$

Para definir el valor de eficiencia y cuanto puede llegar a variar existen una serie de teorías; la teoría más simple y completa es la teoría del balance detallado, la cual fue desarrollada por Shockley y Queisser²⁴, en la que establece que, la corriente que produce una celda solar se determina por el número de fotones absorbidos y emitidos por el dispositivo (celda), esto es debido a que los fotones absorbidos determinan la fotocorriente, mientras que los emitidos relacionan el voltaje de operación como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Esquema Balance Detallado



Fuente: Límites para la máxima eficiencia de celdas solares de silicio: efectos debidos a la generación Auger y a niveles profundos, *Revista Mexicana de Física*, 1996

Gracias a esta teoría se ha podido calcular la eficiencia máxima para Silicio en el orden de 30% a 31% bajo radiación solar.

Esta teoría tiene un principio que la rige, el cual dice que la densidad de corriente que fluye por la celda será determinada por la razón de generación de pares electrón-hueco menos la recombinación total en desequilibrio, por lo cual si f_r es la fracción de pares electrón-hueco entonces:

$$\frac{J}{q} = G_s - \frac{R_d(V) - R_d(0)}{f_r} \quad (11)$$

²⁴ "The Shockley-Queisser limit," 2008. [Online]. Available: http://ph.qmul.ac.uk/sites/default/files/u75/Solar%20cells_environmental%20impact.pdf. [Accessed 15 Agosto 2016]

Donde,

$R_d(V)$ es la razón de recombinación radiativa en la celda.

$R_d(0)$ es la radiación generada por la celda y

Donde, si es un circuito abierto se tendrá a $J=0$, es decir,

$$R_d(V_{oc}) = f_r G_s + R_d(0) \quad (12)$$

Por lo tanto, el voltaje del circuito abierto V_{oc} está dado por:

$$V_{oc} = V_T \ln \left(\frac{f_r G_s}{R_{0T}} + 1 \right) \quad (13)$$

Por lo que se entiende que el voltaje máximo en el circuito abierto se obtendrá cuando $f_r = 1$, es decir, cuando la recombinación de pares electrón-hueco sea nula y toda la recombinación sea causada por la emisión de radiación desde la celda con temperatura T ²⁵

1.2.5 Nuevos materiales para las celdas solares

La fabricación de las nuevas células solares se ha centrado en la búsqueda y producción de materiales fotosensibles de mejor desempeño, con el fin de bajar los costos de instalación y operación. Además, las celdas deben cumplir con ciertos requisitos como estabilidad, eficiencia y baja relación costo-eficiencia con el fin de mejorar las características de las células de silicio que se utilizan actualmente. El empleo de materiales orgánicos tiene una ventaja de tipo ambiental y además presentan mayor absorción de radiación solar a distintas longitudes de onda. Este tipo de celdas pueden elaborarse con dos tipos de materiales: materiales semiconductores sensibilizados por colorante y materiales orgánicos tanto moleculares como poliméricos. Sin embargo, no se ha determinado la frontera entre estos distintos tipos de células²⁶.

La fabricación de las celdas solares debe analizar que la eficiencia de los materiales se distribuya en diferentes longitudes de onda y para esto se han probado semiconductores de película delgada muy parecidos a los utilizados en la industria microelectrónica, que en altas concentraciones elevan su costo pero que resultan en porcentajes de eficiencia muy apetecidos²⁷.

²⁵ A. Morales A., "Límites para la máxima eficiencia de celdas solares de silicio: efectos debidos a la generación Auger y a niveles profundos," Revista Mexicana de Física, pp. 449-458, 1996.

²⁶ MARTIN, N. S. 2000. Células Solares de plástico: Un reto para los nuevos materiales orgánicos del siglo XXI. España: Anales de la Real Academia Española de Química., 2000, págs. 5-11.

²⁷ DIXON. 2005. Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida. Chile : s.n., 2005, págs. 7-10.

En los últimos años se han venido realizando una serie de investigaciones para descubrir materiales que tengan propiedades fotovoltaicas y utilizarlos en la creación de nuevas celdas solares. Uno de esos materiales encontrados es el dióxido de titanio (TiO_2), el cual, por ser inalterable al aire seco o húmedo, estable químicamente a irradiación visible y compatible con colorantes, permite una mejor absorción de luz solar y en consecuencia en la celda ceder una mayor cantidad de electrones al semiconductor, dando como resultado una mayor concentración de energía eléctrica²⁸.

Un material que ha comenzado a tomar fuerza en la implementación de celdas solares es el Cobre (Cu) debido a que es capaz de transportar conductividad eléctrica y calor, tiene la capacidad de formar aleaciones metálicas, por lo que tiene una fuerte demanda en términos de construcción. Posee propiedades bactericidas y es utilizado en agricultura, en mantenimiento de piscinas, entre otros usos. En el ámbito de energía solar, se implementa por la principal característica de transportar conductividad y calor.

Existe otro material llamado Perovskita²⁹. Las perovskitas son materiales cristalinos formados por moléculas de elementos metálicos y no metálicos y formados por enlaces iónicos y/o covalentes. Son frágiles y con baja ductilidad. Pueden ser buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones conductores a temperatura ambiente. Poseen altas temperaturas de fusión y, así mismo, una estabilidad relativamente alta en la mayoría de los medios agresivos por causa de la estabilidad de sus enlaces fuertes³⁰.

Una de las propiedades físicas de las perovskitas son la ferro-electricidad y piezoelectricidad. Se describen estas dos propiedades como cuando un material en el que sus dipolos eléctricos se polarizan y pueden cambiar la dirección del descentrado bajo la influencia de un campo eléctrico. En este tipo de perovskitas la aplicación de un campo eléctrico da como resultado la deformación del cristal y en forma recíproca, la deformación mecánica del cristal genera un campo eléctrico al interior del material. Este fenómeno es conocido como piezoelectricidad y es una característica de todos los ferro-eléctricos; sin embargo, no todos los piezoeléctricos presentan la propiedad de ferro-electricidad.³¹

1.2.6 Caracterización de materiales fotosensibles

Puesto que los paneles solares están cubiertos por diferentes capas las cuales deben responder de forma adecuada a la radiación solar, es necesario determinar si es que en efecto cuentan con las propiedades ópticas que permitan que la capa absorbente del

²⁸ T. G. Erika and A. Gutarra, "Aplicaciones electro-crómicas y foto-catalíticas del dióxido de titanio," 2004.

²⁹ W. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Segunda ed., México: Mc Graw Hill, 1993.

³⁰ A. J. Cuervo, "Propiedades estructurales y espectroscopia de impedancia del estannato tipo perovskita," Bogotá, 2011.

³¹ ROA R., J. 2008. Propiedades y aplicaciones de nuevos materiales de tipo perovskita.

panel tenga un alto coeficiente de absorción y la capa buffer absorba una mínima cantidad de radiación solar. En un material semiconductor, las propiedades ópticas son determinadas por el índice de refracción (n), coeficiente de absorción (α) y valor de E_g con el que cuente. Estos parámetros se obtienen en base a la medición de la transmitancia espectral. Para calcular capas con espesor reducido que no cuenten con suficiente interferencia, se puede calcular su coeficiente de absorción con la siguiente formula:

$$\alpha(h\nu) = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T(h\nu)} \quad (14)$$

Donde:

α es el coeficiente de absorción

d es el espesor de la capa buffer y

T es la transmitancia espectral en función de la longitud de onda.

En caso de que el material tenga transiciones directas permitidas, el coeficiente de absorción estará directamente relacionado con el band gap según la siguiente ecuación:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (15)$$

Donde,

E_g corresponde al Band Gap del material

A es una constante

El valor de E_g se obtiene mediante la extrapolación de la gráfica obtenida de $\alpha(h\nu)^2$ en función de $(h\nu)$ hasta cero.

Por otro lado, estos materiales también deben contar con una característica estructural la cual es dictaminada mediante la difracción de rayos X, puesto que es capaz de obtener información de la estructura cristalina del material. Según la ley de Bragg, los rayos X pueden ser refractados siempre y cuando se cumpla la siguiente igualdad:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (16)$$

Donde,

λ es la longitud de onda del haz incidente.

d es la distancia interplanar.

θ el ángulo entre el haz incidente y el haz difractado.

De igual forma los materiales semiconductores cuentan con otra característica, la caracterización eléctrica ya que es necesario conocer la resistividad de los materiales

implementados en las celdas solares, para poder encontrar el valor de resistividad del material es posible emplear la siguiente formula³²:

$$\rho = \frac{\pi\omega}{Ln2} \left(\frac{V_{23}}{I_{14}} \right) \quad (17)$$

Donde,

ω representa el espesor de las capas de la celda.

V_{23} representa la corriente entre la capa 2 – 3 de la celda.

I_{14} es la corriente entre la capa 1 – 4.

1.2.7 Nanotecnología en las celdas solares

A lo largo de la historia se han ido descubriendo múltiples definiciones para lo que es realmente la nanotecnología, unas por ejemplo, describen esta tecnología como la invención de robots en una escala menor a la utilizada comúnmente, otras personas piensan que es la ciencia de lo infinitamente pequeño, es decir, protones y neutrones. Una de las definiciones más acertadas respecto a qué es la nanotecnología es, la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos o sistemas por medio de control y ensamblamiento a nivel nanométrico. Sin embargo, la Unión Europea está realizando una investigación con el fin de encontrar una definición definitiva.

Actualmente, debido a que en el mercado hay múltiples productos con diversas características, se ha buscado la forma de implementar la nanotecnología en estos productos para mejorar la calidad sin que el consumidor se dé cuenta de la alteración del mismo. La nanotecnología permite mejorar propiedades de la mecánica, estabilidad térmica, biodegradabilidad, entre otros. El centro tecnológico ITENE emplea la nanotecnología para la creación de nuevos materiales biodegradables con mayor resistencia, materiales con refuerzo antioxidante o antimicrobiano, entre otros.

Debido a que la industria de las telecomunicaciones implementa el uso de celdas solares para la creación de paneles, la investigación de nuevas tecnologías es constante, por lo cual la nanotecnología entra a jugar un papel importante, ya que esta tecnología ayuda a una mayor absorción de fotones del espectro solar para la conversión en energía eléctrica; debido a que aun que las celdas solares son muy necesarias, representan un valor económico considerable una de las ideas que han surgido es la inclusión de pozos cuánticos en las celdas solares ya que permite el incremento en la absorción de fotones. Con base a esto, se han estudiado métodos de optimización de eficiencia de celdas, siendo el Arseniuro de Galio-Aluminio (AlGaAs) y el Arseniuro de Galio (GaAs) los materiales primeramente estudiados. Una de las formas de estudiar estos pozos es haciendo la

³² VALLEJO, William A. 2011. Desarrollo de materiales fotovoltaicos usados como ventana óptica en celdas solares. Bogotá: s.n., 2011. Tesis doctoral.

inclusión del MQW (*Metallic Quantum Well*) de GaAsP/InGaAs con tensiones balanceadas en la región intrínseca de una celda solar p-i-n de GaAs.

Para determinar el comportamiento de corriente en función de voltaje en una celda solar con pozos cuánticos se puede utilizar la siguiente formula:

$$J_{MQWSC} = J_0(1 + r_R\beta) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] + (\alpha r_{NR} + r_S) \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] + J_{PH} \quad (18)$$

Donde,

r_R es la razones del incremento de recombinación radiativa.

r_{NR} es la razón de incremento de recombinación no radiactiva.

r_S es la recombinación de interfaces dado la presencia de pozos cuánticos en la región intrínseca.

α y β son parámetros definidos por Anderson.

J_{PH} es la fotocorriente.

La fotocorriente puede determinarse a partir de la integración de la eficiencia cuántica interna $QE_{total}(\lambda)$ con la siguiente ecuación:

$$J_{PH} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) QE_{TOTAL}(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

Donde,

$F(\lambda)$ es el número de fotones por longitud de onda.

La eficiencia cuántica total de la celda puede determinarse conociendo las contribuciones de cada región con la siguiente ecuación:

$$QE_{total}(\lambda) = QE_n(\lambda) + QE_p(\lambda) + QE_{int}(\lambda) \quad (20)$$

Las regiones n y p se evalúan siguiendo el procedimiento de Hovel, en cambio, la región intrínseca tiene presenta la contribución de los pozos³³:

$$QE_{int}(\lambda) = [1 - R(\lambda)] \exp\{-(\sum \alpha_i z_i) * [1 - \exp(-\alpha_B W - NL_W \alpha_W)]\} \quad (21)$$

Donde,

$R(\lambda)$ es la reflectividad en la superficie de la celda en función de la longitud de onda.

N el número de pozos.

L_W el ancho del pozo.

³³ Nanotecnología para la energía fotovoltaica. Hernández, J.C, Rimada, M. Courel y Cabrera, C.I. 2013. México: s.n., 2013.

W el ancho de la región intrínseca.

α_B y α_W son los coeficientes de absorción de los materiales de barrera y de pozos.

2 ESQUEMA TEMÁTICO

2.1 PARÁMETROS FÍSICOS EN MATERIALES FOTOSENSIBLES ACTUALES

2.1.1 Parámetros físicos

Para saber qué materiales fotosensibles son útiles a la hora de construir paneles solares, es necesario tener en cuenta una serie de parámetros, los cuales son:

2.1.1.1 *Flexibilidad*

Condición que posee algún material o inmaterial de moverse sin rigidez, es decir, puede sufrir adaptaciones a los cambios o la movilidad, ser maleable, entre otros. Un material sometido a una cierta cantidad de esfuerzo sufre una deformación, la cual consiste en la deformación del material. Puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{F}{S} = Y \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.1)$$

Donde,

S , es la sección del material $S=\pi r^2$

Y , es una constante de proporcionalidad característica del material.

2.1.1.2 *Pureza*

Se entiende por pureza el estado original de un material, es decir, que no posee contaminación de agentes externos o deterioro. El material es puro cuando no se encuentran mezclas con otros elementos o posee solo un elemento químico en su composición. Existe una ecuación capaz de calcular el porcentaje aproximado de pureza de un material:

$$\%R = \frac{[\alpha]_{medido}}{[\alpha]_{puro}} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde,

$\%R$, es el porcentaje de pureza.

$[\alpha]_{Medido}$, es la cantidad de material a medir.

$[\alpha]$ Puro, es el estimado de pureza del material.

Nota: Este parámetro será aplicable únicamente en la comparación de materiales fotosensibles actuales.

2.1.1.3 Toxicidad

Es la capacidad que posee una sustancia o material químico de perjudicar a un ser vivo. Indica la potencia de una sustancia venenosa pero no su afección, puede expresarse en mg/kg de peso vivo el cual origina determinados efectos en un tiempo dado. Existen varias formas de determinar la toxicidad pero el más utilizado es la LC_{50} (dosis letal), la cual sobrepasa el 50% de toxicidad en un material, es un índice de toxicidad aguda establecida por un estudio estadístico. Existen dos tipos de toxicidad³⁴:

- Toxicidad aguda: efecto manifiesto generado por la administración de una dosis de determinada sustancia. Esta toxicidad es capaz de producir una respuesta relativamente rápida en periodos de tiempo de 48 a 96 horas.

$$UT_a = 100/CL_{50} \quad (2.3)$$

Donde:

CL_{50} es la concentración letal que produce la muerte en %.

- Toxicidad crónica: efecto a largo plazo, el cual puede mantenerse una décima parte de la vida de la especie. Se relacionan con cambios metabólicos, crecimiento y capacidad de supervivencia.

$$UT_c = 100/CENO \quad (2.4)$$

Donde:

CENO es la concentración de efectos no observables, es decir, mayor concentración continuada donde no se observa reacción crónica en la especie.

2.1.1.4 Conductividad

Se conoce como la propiedad física presente en cuerpos, materiales o elementos que hace que estos sean capaces de conducir electricidad o calor. Es decir, permite tener la capacidad del paso libre de electricidad sobre los materiales.

³⁴ AUREUM, Miliarium. 2004. Miliarium. Índice de toxicidad. [En línea] 2004. [Citado el: 17 de Febrero de 2017.] <http://www.miliarium.com/prontuario/indices/IndicesToxicidad.htm>.

La conductividad permite transmitir una corriente eléctrica, esto gracias a que hay existencia de iones los cuales poseen concentración, movilidad, valencia y temperatura ambiental. La conductancia se mide usando electrodos químicamente inertes y es directamente proporcional al área superficial del electrodo e inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos, para lo cual se puede utilizar la siguiente ecuación³⁵:

$$G = k \frac{A}{L} \quad (2.5)$$

Donde,

A es el área superficial del electrodo.

k es la constante de proporcionalidad.

L es la distancia entre los electrodos.

Existen una serie de condiciones básicas que permiten determinar la capacidad conductora, la estructura molecular y atómica, así como también la temperatura del material. Los materiales a resaltar sobre esta propiedad son los metales, debido a su elevada conducción de electricidad gracias a su estructura atómica. Es importante recalcar que el mecanismo de la conductividad variará según el estado de la materia, esto en cuando a la conductividad eléctrica. La conductividad térmica, permite que ciertos materiales tengan la capacidad de conducir calor, es decir, un elemento transmite la energía cinética desde sus moléculas hacia las más cercanas³⁶.

2.1.1.5 Temperatura

Medida de calor o energía térmica en una sustancia. Se define como una propiedad que fija el flujo de calor debido a que pasa del cuerpo con mayor temperatura al cuerpo con menor temperatura. En la actualidad existen 3 escalas de temperatura: grados Fahrenheit (°F) utilizada mayormente en EE.UU, define los puntos de congelación y ebullición del agua en 32 y 212 °F; grados Celsius (°C) son divididos en 100 grados entre el punto de congelación (0 °C) y el punto de ebullición (100 °C) y; grados Kelvin (°K) es entendido como la escala de temperatura absoluta.

La temperatura varia esporádicamente, es posible saber la temperatura media diaria, mensual o anual de una locación las cuales son representadas en mapas por medio de líneas denominadas “isotermas” las cuales unen los puntos de la superficie terrestre. Para convertir los tipos de temperatura se emplean las siguientes formulas³⁷:

- Conversión de Celsius a Fahrenheit:

³⁵ Parámetros físico-químicos: Conductividad. Puerto Rico: Recinto Universitario de Mayagüez.

³⁶ Definición ABC. [En línea] 2009. [Citado el: 07 de Julio de 2016.]

<http://www.definicionabc.com/ciencia/conductividad.php>.

³⁷ CORTES I., María de Lourdes. 2009. Academia de bioinstrumentación. México: s.n., 2009.

$$^{\circ}F = ^{\circ}C * 1.8 + 32 \quad (2.6)$$

- Conversión de Fahrenheit a Celsius:

$$^{\circ}C = \frac{(^{\circ}F - 32)}{1.8} \quad (2.7)$$

- Conversión de Kelvin a Celsius:

$$^{\circ}C = K - 273.15 \quad (2.8)$$

- Conversión de Kelvin a Fahrenheit:

$$^{\circ}F = 1.8(K - 273.15) + 32 \quad (2.9)$$

Nota: Este parámetro será aplicable únicamente en la comparación de nuevos materiales fotosensibles.

2.1.2 Cuadro comparativo entre materiales fotosensibles actuales

Tomando en cuenta los conocimientos que se tiene sobre los materiales que actualmente se utilizan para la construcción de paneles solares, se tomó una serie de estos para evaluar sus propiedades físicas y determinar mediante un cuadro comparativo

2.1.2.1 Propiedades del silicio

El Silicio es uno de los materiales de mayor abundancia en la corteza terrestre. Hace parte de los elementos semimetales, los cuales cuentan con propiedades intermedias entre metales y no metales de ahí se debe que su conductividad eléctrica sea la de un semiconductor intrínseco, sin embargo, la intensidad de su semiconducción se ve grandemente afectada al introducir pequeñas cantidades de impurezas. Posee propiedades tetravalentes, aunque con ciertos compuestos es divalente, y es netamente electropositivo en su comportamiento químico³⁸. Es un material relativamente inerte y la mayoría de los ácidos no le afectan, a excepción del ácido fluorhídrico. Este material tiene un alto nivel de toxicidad, esto ya que la inhalación de este en grandes cantidades puede provocar silicosis (enfermedad mortal), los mineros son los más propensos al riesgo de contraerla debido a la naturaleza de su profesión. Existe el Silicio orgánico, el cual posee altos niveles de flexibilidad lo que permite proteja los compuestos en los que es utilizado, ya sea electrónicos o medicinales.

³⁸ BV, L. (2009). Lenntech. Recuperado el 03 de Mayo de 2016, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm>

Es empleado en su mayoría como ingredientes de aleación para mayor resistencia al aluminio, magnesio, cobre, entre otros. Una de sus derivaciones es el Silicio Metalúrgico, el cual posee una pureza del 98% – 99% y es utilizado como prima en la manufactura de componentes organosilícicos. Otro de los usos del silicio son los “chips de silicio”, los cuales son empleados en circuitos integrados así como en células fotovoltaicas para la conversión de energía solar en energía eléctrica en forma de obleas cortadas de cristales de silicio en grado electrónico. Otro posible uso del Silicio es en tratamientos de belleza, esto es debido a que el Silicio en su forma orgánica forma parte de muchas partes del cuerpo humano, por ejemplo, las uñas, el cabello, huesos, dientes, y el tejido conectivo.

2.1.2.2 Propiedades del grafeno

Posee propiedades de los metales, es decir, es un semiconductor gap superficial, posee un campo eléctrico ambipolar tal que los conductores de carga puede modular continuamente entre electrones llegando a exceder una movilidad de hasta $15000\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, lo cual hace que sea un gran semiconductor³⁹. Está conformado por anillos hexagonales de átomos de carbono. Este material posee una serie de características, como son: alta conductividad térmica y eléctrica, alta elasticidad y dureza, alta resistencia (aun mayor que el acero y similar al diamante), alta flexibilidad, inmunidad a la radiación ionizante, posee la capacidad de generar electricidad por exposición a luz solar, transparencia, densidad capaz de restringir el paso del helio pero no del agua lo que genera una evaporación acelerada. Además, cuenta con una cualidad importante a considerar y es el efecto antibacteriano, estudios prueban el comportamiento del Grafeno en organismos vivos, y se comprobó que carece de bacterias, es decir, las bacterias no crecen en él, por lo cual es candidato a ser empleado en alimentos o medicina.

Existen otra serie de características las cuales aún están en proceso de evaluación según la Universidad de Illinois, estas indicarían que el Grafeno es un material capaz de auto-enfriarse o auto-recuperarse, lo que indicaría que en el momento que pierda un átomo de carbono, los demás que estén cerca se juntarían para cerrar el hueco creado. Por las propiedades naturales del Grafeno es considerado uno de los materiales de mayor relevancia en el campo de la tecnología, en la creación de circuitos integrados, existen las teorías que indican que el Grafeno puede crear procesadores más rápidos que los actuales. Uno de los mayores inconvenientes del Grafeno es que a diferencia del Silicio, no cuenta con resistividad eléctrica lo que hace que no pueda conducir electricidad. Científicos como Walt De Heer, apoyan el uso del Grafeno como sustituto del Silicio.

Existe un derivado del Grafeno, el cual es el Grafeno de lámina, tiene un alto nivel de pureza y reúne muchas propiedades relevantes, es empleado principalmente para la

³⁹ Rodríguez, G. C. (2008). Propiedades y aplicaciones del Grafeno. México. UANL.

fabricación de electrodos de batería, pantallas táctiles, células solares, electrónica digital y analógica, etc.⁴⁰

Teniendo en cuenta las propiedades pertenecientes a los materiales anteriormente mencionados, se encontró que estos materiales poseen propiedades en común, por lo cual se hará un cuadro comparativo identificando los valores de los materiales en cada propiedad.

Tabla 2. Tabla comparativa entre materiales fotosensibles actuales

PARAMETROS FÍSICOS EN MATERIALES FOTOSENSIBLES ACTUALES				
MATERIALES	PARAMETROS FÍSICOS			
	Flexibilidad	Toxicidad	Pureza	Conductividad
SILICIO	Alta	Media	Muy alta	Alta
GRAFENO	Alta	Bajo	Alta	Media

Como se observa en la Tabla 2, tanto el Silicio como el Grafeno son materiales que califican para la implementación de celdas solares ya que ambos cuentan con altos niveles de flexibilidad y pureza, lo que es importante a la hora de crear una celda solar, dado que es necesario que el material a utilizar cuente con la flexibilidad necesaria para moldearse según las características del panel; en términos de pureza es preferible un material con altos niveles de pureza ya que eso intensifica el paso de radiación y evita el paso de contaminantes (impurezas) a las celdas. Sin embargo, el Silicio tiene una ventaja sobre el Grafeno y es que cuenta con un mayor nivel de conductividad, este es uno de los factores de mayor importancia debido a que se busca obtener un material que intensifique la conversión de luz solar en energía eléctrica para que de esta forma se amplifique la eficiencia de las celdas. Por otro lado, el Grafeno cuenta con un bajo nivel de toxicidad, por lo que se entiende que es más recomendable su uso en términos de salud, cabe aclarar que el Silicio solo si bien es toxico, su riesgo es considerado únicamente en altas cantidades.

Debido a esto, tanto el Grafeno como el Silicio son materiales de gran importancia en la industria de la energía solar dado que la desventaja de uno es la ventaja del otro, es decir, estos materiales se mantienen nivelados uno con el otro por lo que la creación de celdas solares tendría un porcentaje de eficiencia similar.

2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE NUEVOS MATERIALES FOTOSENSIBLES Y ASPECTOS ESTRUCTURALES

⁴⁰ SEAS. 2012. BlogSEAS. [En línea] 22 de Octubre de 2012. [Citado el: 28 de Agosto de 2016.] <http://www.seas.es/blog/automatizacion/el-grafeno-propiedades-caracteristicas-y-aplicaciones/>.

Tomando como base los parámetros físicos mencionados en el Capítulo 2, se realizó un cuadro comparativo tomando en cuenta los nuevos materiales fotosensibles que intervienen en la eficiencia de celdas solares, los cuales cuentan con estas propiedades.

2.2.1 Cuadro comparativo de nuevos materiales fotosensibles

En la actualidad se han ido realizando investigaciones relacionadas al incremento de eficiencia en los paneles solares, de las cuales se descubrieron una serie de materiales fotosensibles como el dióxido de titanio (TiO_2), la perovskita, el cobre (Cu), entre otros; cuyas características permiten un incremento en la recolección y transformación de energía.

2.2.1.1 Propiedades del dióxido de titanio

Semiconductor sensible a la luz el cual absorbe radiación electromagnética cercana a la UV (ultra-violeta). Se caracteriza por ser húmedo e inalterable ante el aire seco, tener alta estabilidad química e inmunidad a ataques de agentes orgánicos e inorgánicos. Comúnmente es hallado en su forma natural, de color negro o castaño. Puede ser empleado como pigmento y producción de cerámica. Es de gran importancia en la industria por su alta estabilidad química y su bajo nivel de toxicidad.

El dióxido de titanio se produce en dos formas: la forma pigmentaria, hace uso de propiedades de dispersión de la luz pertenecientes al dióxido de titanio en aplicaciones que requieren brillo y reducción de blanco y la forma ultrafino, implementada cuando se requieren diferentes propiedades, como la transparencia y la máxima absorción de la luz ultravioleta. En términos industriales, el 95% del dióxido de titanio es utilizado como aislante eléctrico debido a su bajo nivel de conductividad.

2.2.1.2 Propiedades del cobre

Metal de transición caracterizado por su color rojizo con tonalidades brillantes y su capacidad de ser maleable, dúctil y un muy buen conductor. Normalmente es extraído en forma de sulfuro u óxidos. Es resistente a la atmosfera, agua limpia y agentes químicos externos. Dado que este material es perteneciente al grupo de elementos de transición, una característica a resaltar del cobre, es que es amagnético, es decir, no tiene magnetismo, lo cual permite que no sea atraído por los polos, su elevado nivel de dureza, ebullición y fusión.⁴¹

A pesar de ser un elemento tan utilizado, posee un nivel de toxicidad a considerar, debido a que hay ciertos materiales que contienen sulfato de cobre, al inhalar o beber este

⁴¹ El cobre, cobre puro. Generalidades sobre el cobre y sus usos. 2.

material, puede ocasionar efectos como vómito, náuseas, diarrea, sudoración, entre otras cosas, sin embargo, no hay un elemento del cobre lo suficientemente tóxico como para generar la muerte en una persona a menos que sea en porciones mayores a gramos.⁴²

2.2.1.3 Propiedades del perovskita

La perovskita es un material con estructura cristalina compuesta por innumerables combinaciones, se caracteriza por su alta termo-potencia y sus propiedades magnéticas, las cuales permiten una alta conductividad de energía. Este material es normalmente utilizado como sensores y electrodos catalizadores de combustible. Existen muchos superconductores de perovskita los cuales poseen metales como el cobre. Estudios recientes del Instituto de Investigación Química de Corea han demostrado que para la fabricación de células solares de perovskita ha dado como resultado un incremento de eficiencia del 20.1% en 5 años, si comparamos su rendimiento con las celdas de silicio, la capacidad de conversión de energía solar es superior en las células de perovskita ya que las células de silicio lograron su eficiencia actual de 25% en 20 años de investigación. El uso de la perovskita es altamente factible debido a que los materiales para sintetizarla son abundantes en la corteza terrestre, se espera que en unos años las placas de perovskita sean finas y flexibles con el fin de mejorar el revestimiento de los paneles solares⁴³.

Mientras que las celdas solares de silicio se fabrican a temperaturas mayores de 200 grados, los materiales de perovskita se fabrican a muy bajas temperaturas, algunas veces pueden ser a temperatura ambiente, lo que reduce el costo de fabricación y la disponibilidad de materiales.

Teniendo en cuenta las propiedades pertenecientes a los materiales anteriormente mencionados, se encontró que estos materiales poseen propiedades en común, por lo cual se hará un cuadro comparativo identificando los valores de los materiales en cada propiedad.

Tabla 3. Tabla comparativa entre nuevos materiales fotosensibles

PARAMETROS FÍSICOS EN NUEVOS MATERIALES FOTOSENSIBLES				
MATERIALES	PARAMETROS FÍSICOS			
	Flexibilidad	Toxicidad	Temperatura	Conductividad
DIOXIDO DE TITANIO	Media	Bajo	Baja	Bajo
COBRE	Medio	Bajo	Alta	Muy alto
PEROVSKITA	Medio	Bajo	Bajo	Alto

⁴² NORDBERG, Gunnar. Metales: Propiedades químicas y toxicidad. *Productos químicos*.

⁴³ *Placas solares de perovskita*. SIVARAM, Varum. 2015. 2015, Investigación y Ciencia.

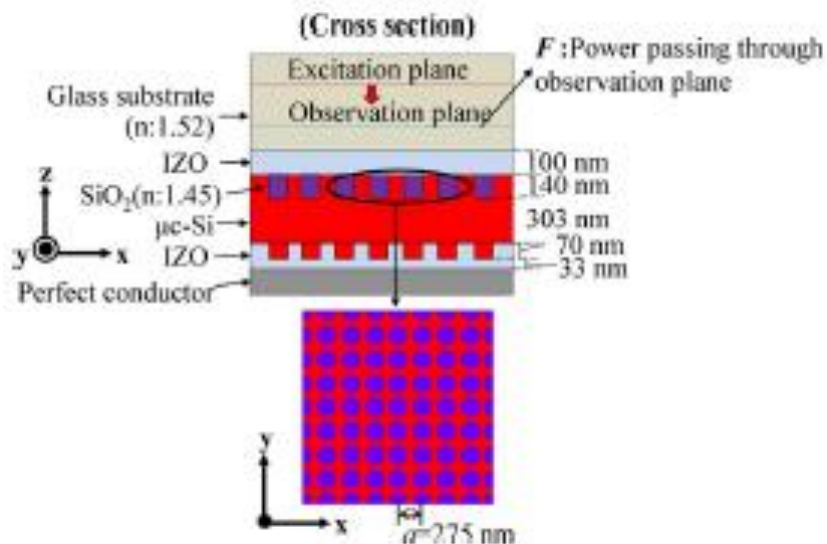
Como se observa en la Tabla 3, todos los materiales califican para la implementación de celdas solares, ya que todos cuentan con un nivel medio de flexibilidad y un nivel bajo de toxicidad, lo cual es muy importante a la hora de crear una celda solar, dado que es necesario que el material a utilizar cuente con la flexibilidad necesaria para moldearse según las características del panel. Gracias al nivel de toxicidad, la implementación de los materiales tendrá un riesgo mínimo en la salud y el desempeño del panel y el personal que manipule el mismo. Sin embargo, existen una serie de diferencias a resaltar entre estos materiales, las cuales son: 1) El cobre requiere trabajar en altas temperaturas mientras que el dióxido de titanio y la perovskita pueden ser moldeadas a bajas temperaturas, lo que facilita su manipulación y 2) El dióxido de carbono posee un bajo nivel de conductividad eléctrica, este es uno de los factores de mayor importancia debido a que se busca obtener un material que intensifique la conversión de luz solar en energía eléctrica para que de esta forma se amplifique la eficiencia de las celdas, mientras que la perovskita posee un nivel alto de conductividad y el cobre un nivel muy alto de conductividad.

De lo anterior, se puede concluir que, el cobre es la mejor opción para la implementación de nuevas celdas fotosensibles debido a sus características, las cuales sobresalen de los demás materiales, seguido de la perovskita, la cual posee ventaja a nivel industrial por su fácil uso e implementación y bajo costo.

2.2.2 Aspectos estructurales

El uso de energías renovables a nivel mundial ha sido de gran interés en los últimos años. Se ha pensado en la implementación de materiales fotosensibles como el Silicio para la creación estructural de paneles solares ya que estos cuentan con un grosor de entre 100 a 200 m.

Figura 17. Estructura de las células solares



Fuente: *Structural Optimization of Photonic Crystals for Enhancing Optical Absorption of Thin Film Silicon Solar Cell Structures*. Yosuke, Kawamoto, Yoshinori, Tanaka y Kenji, Ishizaki. 2014. 1, s.l.: IEEE, 2014, Vol. 6. [Citado el: 05 de abril de 2017]

La Figura 17 se muestra la estructura en cuanto a medidas de las células solares, en este caso, tiene una altura de 140 nm, un espesor de 303 nm, un espesor de capa de IZO de 33 nm, etc. Se han realizado una serie de investigaciones con el fin de determinar si la absorptividad óptica promedio aumenta dependiendo el tipo de estructura empleada. Para realizar los cálculos de las células solares se utilizó de base la estructura de la Figura 17 tomando los valores mencionados anteriormente.

En el diseño estructural se debe emplear un periodo fotónico de súper-latas de 4 x 4, para mantener la periodicidad de la estructura fotónica cristalina original. Como primer paso del diseño estructural, se debe explorar diversas estructuras de cristal fotónico las cuales contengan una gran absorción óptica. De esto, en múltiples investigaciones se encontraron estructuras de cristal fotónico con una simetría rotacional con la capacidad de realizar las polarizaciones independientes características del panel. Como prueba experimental se tomaron cuatro valores iniciales, los cuales son: 0,00 a, 0,15 a, 0,30 a, y 0,45 a, suponiendo sea el radio de capa varilla y se enumeró 4096 tipos de estructuras simétricas. Como paso a seguir, se debe calcular F (potencia que pasa a través del plano de observación) para cada estructura. “...Cuando hay absorción en los materiales fotovoltaicos, la potencia, que pasa por el plano de observación en la dirección opuesta después de la reflexión, se reduce”.

Para realizar el diseño de una célula solar, se deben tener en cuenta los radios de los cristales del material fotónico a utilizar, al igual que la posición y el tamaño de este. Las variaciones de las células dependen del cambio de permitividad del espacio. La fuente de excitación la cual pasa a través del plano de observación, se establece en la función de objeto, y se define de la siguiente forma⁴⁴:

$$F = \int_S \left(\int_0^T G' dt \right) dS \quad (2.10)$$

$$G' = E_x H_y - E_y H_x \quad (2.11)$$

Donde,

E_x (E_y) y H_x (H_y) son los campos eléctricos y magnéticos.

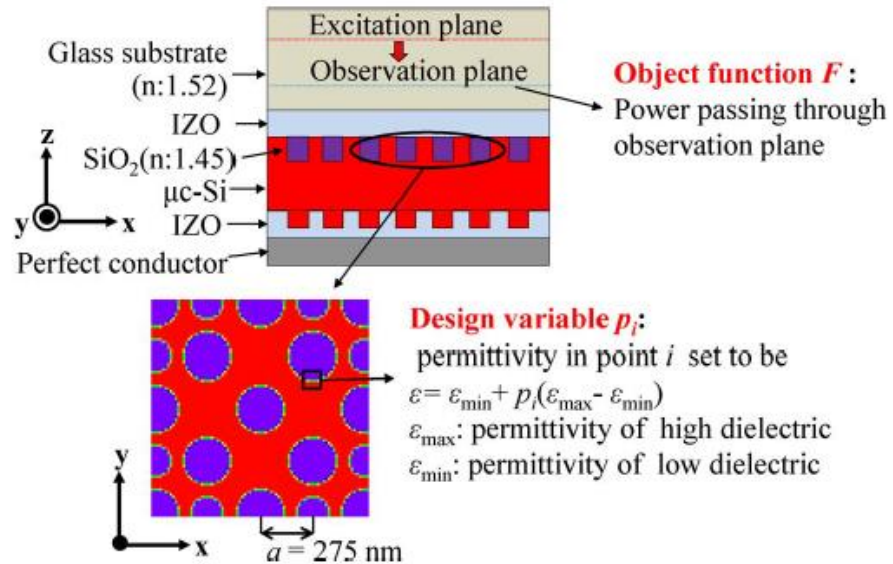
F es la absorción óptica en el material fotovoltaico.

$$\rho_i = \begin{cases} 1, & (\text{alta permitividad del material}) \\ 0, & (\text{baja permitividad del material}) \end{cases} \quad (2.12)$$

Donde,

P_i es la permitividad en el punto “i” del plano designado del cristal fotónico.

Figura 18. Parámetros requeridos para el diseño estructural



⁴⁴ Structural Optimization of Photonic Crystals for Enhancing Optical Absorption of Thin Film Silicon Solar Cell Structures. Yosuke, Kawamoto, Yoshinori, Tanaka y Kenji, Ishizaki. 2014. 1, s.l.: IEEE, 2014, Vol. 6.

Fuente: *Structural Optimization of Photonic Crystals for Enhancing Optical Absorption of Thin Film Silicon Solar Cell Structures*. Yosuke, Kawamoto, Yoshinori, Tanaka y Kenji, Ishizaki. 2014. 1, s.l.: IEEE, 2014, Vol. 6. [Citado el: 05 de abril de 2017]

En la Figura 18 se muestran la estructura de los parámetros que se requieren para realizar el diseño estructural de las células solares, los cuales fueron definidos en la Ecuación 2.1 y la Ecuación 2.3.

$$\varepsilon = \varepsilon_{min} + \rho_i(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \quad (2.13a)$$

$$\sigma = \sigma_{min} + \rho_i(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (2.13b)$$

Donde,

ε y σ se definen utilizando ρ_i .

Suponiendo que la permitividad ε y la conductividad σ tomen un valor intermedio entre el punto máximo y mínimo entre cada punto.

2.3 CONDICIONES GEOGRÁFICAS, TOPOGRÁFICAS Y AMBIENTALES PARA EL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE INSTALACIÓN ELECTRICA

En este capítulo se contemplaran las condiciones ideales tanto geográficas, topográficas como ambientales para el diseño de un prototipo de un panel solar, el cual compruebe el incremento de porcentaje de eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica.

2.3.1 Condiciones atmosféricas

Con el fin de establecer el diseño de un prototipo de un panel solar, se establecieron una serie de condiciones a tener en cuenta: geográfica, topográfica y ambiental en la ciudad de Bogotá.

Tabla 4. Datos topográficos de Bogotá
NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data
Latitud: 4,648 Longitud: -74,248

	Unidad	Climate data location	
Latitude	°N	4.648	
Longitude	°E	-72,248	
Elevation	m	1431	
Heating design temperature	°C	14.35	
Cooling design temperature	°C	24.22	
Earth temperature amplitude	°C	7.8	
Frost days at site	day	0	

Month	Air temperature °C	Relative humidity %	Daily solar radiation - horizontal kWh/m2/d	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s	Earth temperature °C	Heating degree-days °C-d	Cooling degree-days °C-d
January	19.2	76.6%	4.86	85.7	1.6	20.6	0	292
February	19.7	75.1%	4.83	85.7	1.7	21.4	0	277
March	19.7	78.8%	4.91	85.7	1.7	21.4	0	305
April	19.6	80.8%	4.65	85.7	1.6	21.2	0	289
May	19.4	79.7%	4.72	85.8	1.6	20.8	1	292
June	18.9	77.8%	4.83	85.9	1.9	20.2	2	267
July	18.9	70.8%	5.00	85.9	2.0	20.3	3	275
August	19.7	63.9%	5.07	85.9	1.8	21.4	0	303
September	20.2	65.0%	5.03	85.8	1.7	22.1	0	307
October	19.7	74.5%	4.70	85.8	1.5	21.4	0	302
November	19.2	81.1%	4.60	85.7	1.5	20.5	0	278
December	19.0	80.7%	4.60	85.7	1.7	20.2	0	286
Annual	19.4	75.4%	4.82	85.8	1.7	20.9	6	3473
Measured at (m)					10.0	0.0		

Fuente: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=&step=1&lat=4.6482837&lon=-74.2478938&submit=Submit>. [Citado el: 30 de Enero de 2017]

La Tabla 4 muestra los valores a tener en cuenta suponiendo que el panel solar sea instalado en la ciudad de Bogotá, son los valores de longitud, latitud, temperatura del aire, temperatura de la tierra y la radiación solar diaria todo esto por mes.

2.3.2 Simulación

2.3.2.1 PVSOL Expert 6.0

Es un software de uso fácil y hecho para la práctica real tanto para el dimensionamiento como para el diseño, la simulación dinámica y la evaluación de rendimientos para instalaciones de energía solar fotovoltaica.

2.3.3 Datos experimentales generales

Para el desarrollo de la simulación de paneles solares se utilizaron datos reales de consumo eléctrico promedio de una casa estrato medio-alto:

Tabla 5. Datos uso eléctrico promedio en una vivienda estrato medio - alto

DATOS PANELES SOLARES						
	ÍTEM	CANTIDAD	POTENCIA (W)	TOTAL POTENCIA (W)	CONSUMO (H)	ENERGIA TEORICA (WH)
1	Bombillo Led 10 W	10	10	100	8	800
2	Televisor LCD 23"	3	60	180	8	1440
3	Nevera Mediana	1	600	600	24	14400
4	Plancha	1	1000	1000	1	2000
5	PC	1	200	200	7	1400
6	Radio	1	30	30	4	120
7	Reproductor de DVD	1	200	200	2	400
8	Router	1	15	15	24	360
9	Lavadora	1	1050	1050	1	1050
	TOTAL			3375		21970

Una vez establecidos los datos de la Tabla 5, se prosiguió a configurar el simulador como se muestra a continuación:

Figura 19. Configuración modelo de panel

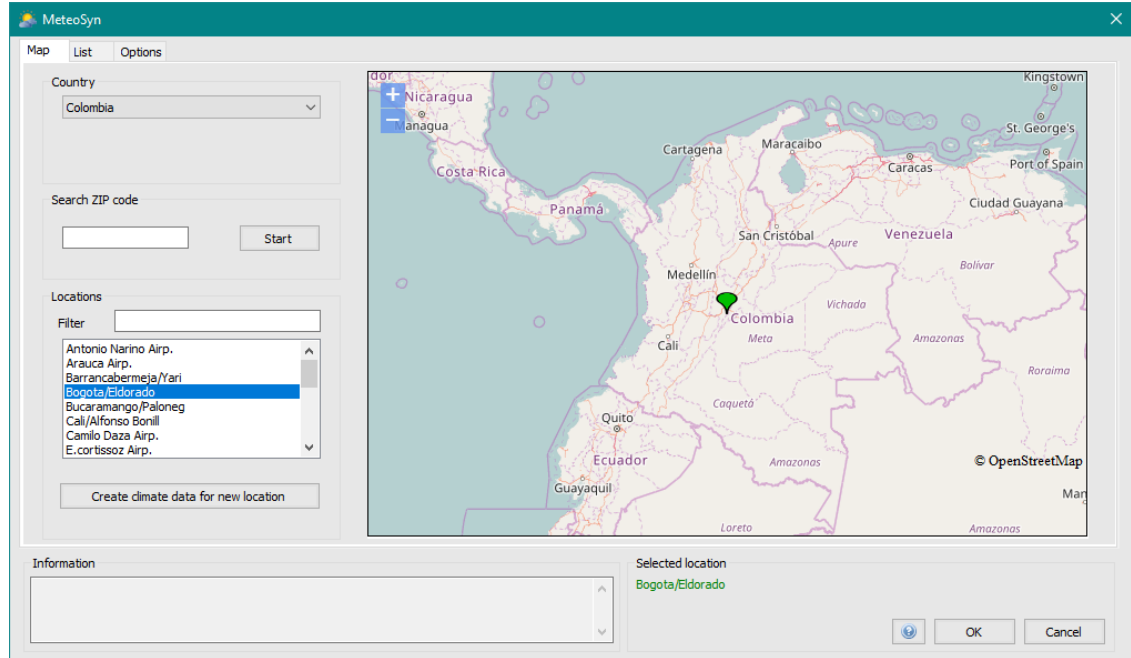
The screenshot displays the 'Stand-Alone Systems Quick Design' software window. The interface is organized into several sections with expandable/collapsible buttons on the left:

- Project Name:** ProyectoTesis1
- Climate Data:** Bogota/Eldorado
- Consumption:** Annual Energy Requirement: 905,0 kWh
- PV System:**
 - PV Module:** PV*SOL Example, With MPP Tracking ☐
 - PV Array Orientation:** Azimuth: 0,00 °, Tilt Angle: 5 °
 - Battery:** PV*SOL Example, System Voltage: 48 V
 - Lower Battery Discharge Threshold:** 30,00 % (*) (ref. to Nom. Battery Capacity)
- Design Criteria:**
 - Design for:** Worst Month
 - Period of Autonomy:** 1 Days
 - System Recovery Period:** 1 Days
- Design:**
 - Battery Capacity:** 89,3 Ah
 - PV Output:** 1560 Wp
 - No. of Batteries:** 1,6
 - No. of Modules:** 55,6
- Sizing:**
 - Update** button
 - Battery Capacity [Ah]:** 230,0
 - No. of Batteries:** 4
 - No. of Batteries in Series:** 4
 - PV Output [W]:** 2016
 - No. of Modules:** 56
 - No. of Modules in Series:** 4
 - Gross PV Surface Area [m²]:** 31,36

At the bottom, there are buttons for 'Save as Default', 'Technical Data', 'Simulation', and 'OK'.

En la Figura 19 se observa la configuración inicial del panel, en donde se establece el nombre del proyecto, la ubicación climática y el tipo de panel, de igual forma se establece el ángulo de inclinación y el periodo de autonomía con el que va a contar el panel.

Figura 20. Datos climaticos



En la Figura 20 se observa el programa utilizado para especificar la ubicación geográfica del panel, el cual es una base de datos de los aeropuertos mundiales. En el caso del simulador se utilizó la ciudad de Bogotá.

Figura 21. Formato de adición de aparatos electrónicos

Individual Appliances

Name:

Model:

Output [W]:

Stand-by Input [W]:

Operating Times

☒ All Days the Same

Appliance switches on during the selected operating times as follows

☒ No other Restrictions

☐ Nighttime only

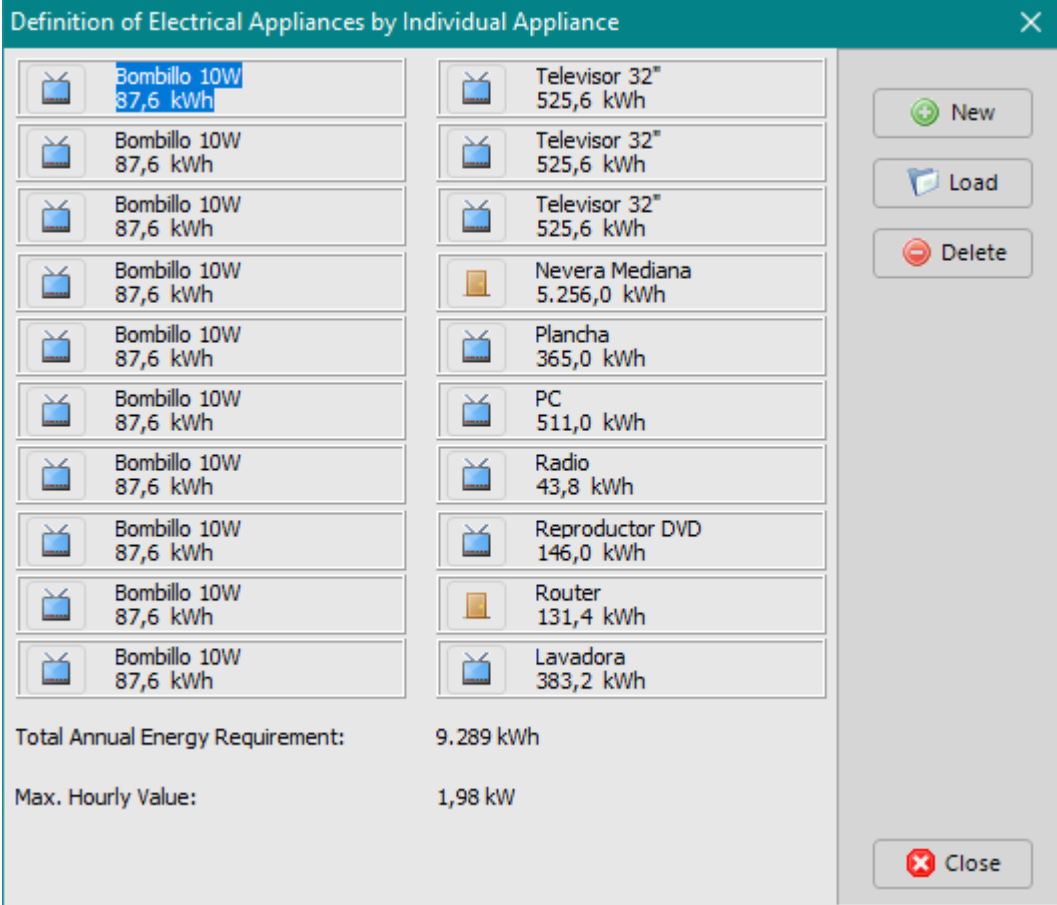
☐ Daytime only

Operating Time: 365 Days

Buttons: Load, Save, Graph, OK, Cancel

En la Figura 21 se muestra el formato en el cual se crean los aparatos individuales que van a formar parte del consumo energético de la simulación, asignando: el nombre, el tipo de modelo dependiente o independiente, es decir, si se utiliza todo el día o durante periodos de tiempo, la potencia y las horas de uso.

Figura 22. Listado de aparatos eléctricos del simulador



Definition of Electrical Appliances by Individual Appliance	
Bombillo 10W 87,6 kWh	Televisor 32" 525,6 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Televisor 32" 525,6 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Televisor 32" 525,6 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Nevera Mediana 5.256,0 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Plancha 365,0 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	PC 511,0 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Radio 43,8 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Reproductor DVD 146,0 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Router 131,4 kWh
Bombillo 10W 87,6 kWh	Lavadora 383,2 kWh
Total Annual Energy Requirement: 9.289 kWh Max. Hourly Value: 1,98 kW	

Buttons: New, Load, Delete, Close

En la Figura 22 se observa el listado final de los aparatos electrónicos proporcionados por los datos recolectados de la Tabla 5.

2.3.3.1 Datos experimentales panel monocristalino

Figura 23. Características del panel monocristalino

Module Characteristic Values

Basic Data | U/I Char. - STC | U/I Char. - Part Load | Other Data

Manufacturer: Canadian Solar Inc.

Model: CS6X-305M

Lower Output Tolerance [%]: 0,0

Upper Output Tolerance [%]: 2,0

Cell Type: Si Monocrystalline

☐ Only Suitable for Transformer Inverters

Number of Cells: 72 | Number of Bypass Diodes: 3

☒ Cell Strings Perpendicular to Short Side | ☐ Cell Strings Parallel to Short Side

Dimensions

Width [mm]: 982 | Depth [mm]: 40

Height [mm]: 1.954 | Frame Width [mm]: 35

Gross Surface Area [m²]: 1,92

Buttons: Load, Save As..., Save, Print, Close

En la Figura 23 se observa los datos básicos de la configuración del panel monocristalino, entre los cuales se encuentran: el modelo del panel, la tolerancia de salida, el tipo de celda, el número de celdas (células) y el número de diodos bypass y, la orientación del panel (paralelo o perpendicular).

Figura 24. Datos característicos de temperatura en el panel monocristalino

The image shows a software window titled "Module Characteristic Values" with a close button (X) in the top right corner. The window has four tabs: "Basic Data", "U/I Char. - STC", "U/I Char. - Part Load", and "Other Data" (which is currently selected). The "Other Data" tab contains several input fields for temperature-related parameters.

Temperature Coefficient

- Voltage Coefficient (Uoc): ☒ [mV/K] -158,20 ☐ [%/K] -0,3500
- Electricity Coefficient (Isc): ☒ [mA/K] 5,30 ☐ [%/K] 0,0600
- Output Coefficient [%/K]: -0,450

Incident Angle Modifier [%]: 95,0

Maximum System Voltage [V]: 1.000,0

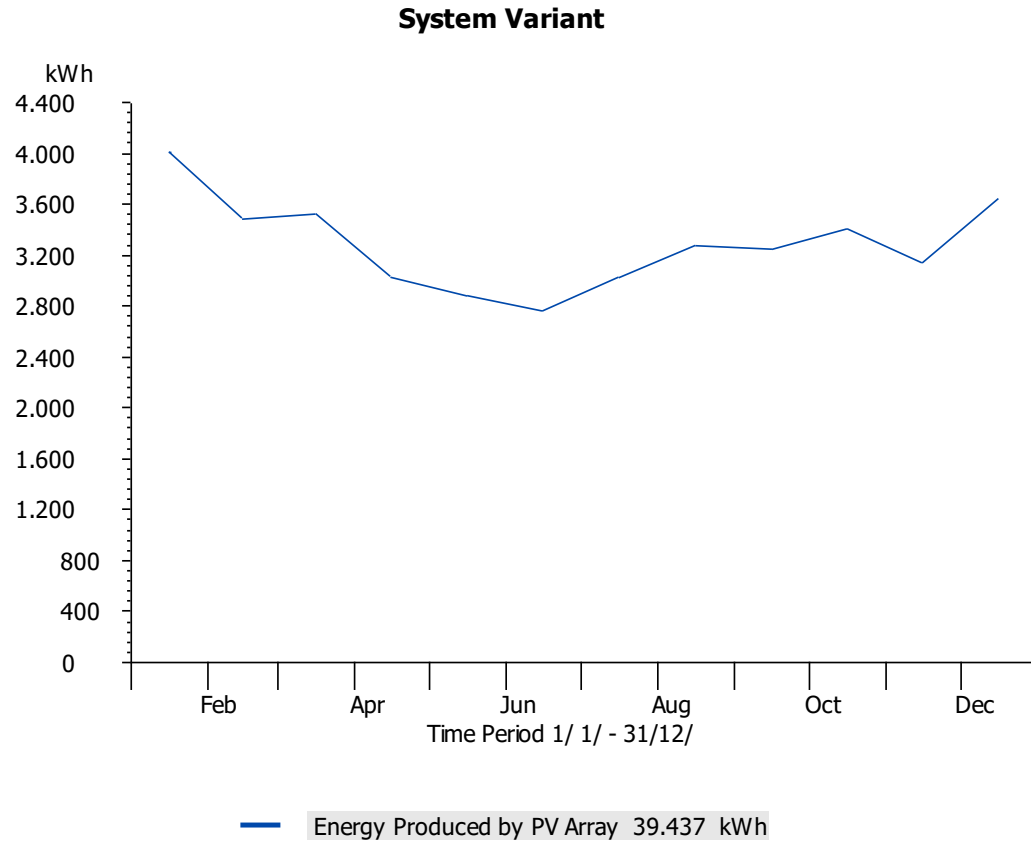
Data for Dynamic Temperature Model

- Spec. Heat Capacity [J/(kg*K)]: 920,0
- Absorption Coefficient [%]: 70,0
- Emissions Coefficient [%]: 85,0
- Weight [kg]: 27,00

On the right side of the window, there are five buttons: "Load", "Save As...", "Save", "Print", and "Close".

En la Figura 24 se observan una serie de datos alternos del panel monocristalino, de los cuales se resaltan los siguientes: coeficientes de voltaje y electricidad, coeficientes de emisión y absorción.

Figura 25. Energía eléctrica producida anualmente



Se realizó una simulación de 36.600 kW pico con un panel solar de tipo monocristalino basado en las características presentes en las Figura 23 y Figura 24. Se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$\# \text{ paneles} * P_{max} = P_{Total} \quad (2.14)$$

Donde,

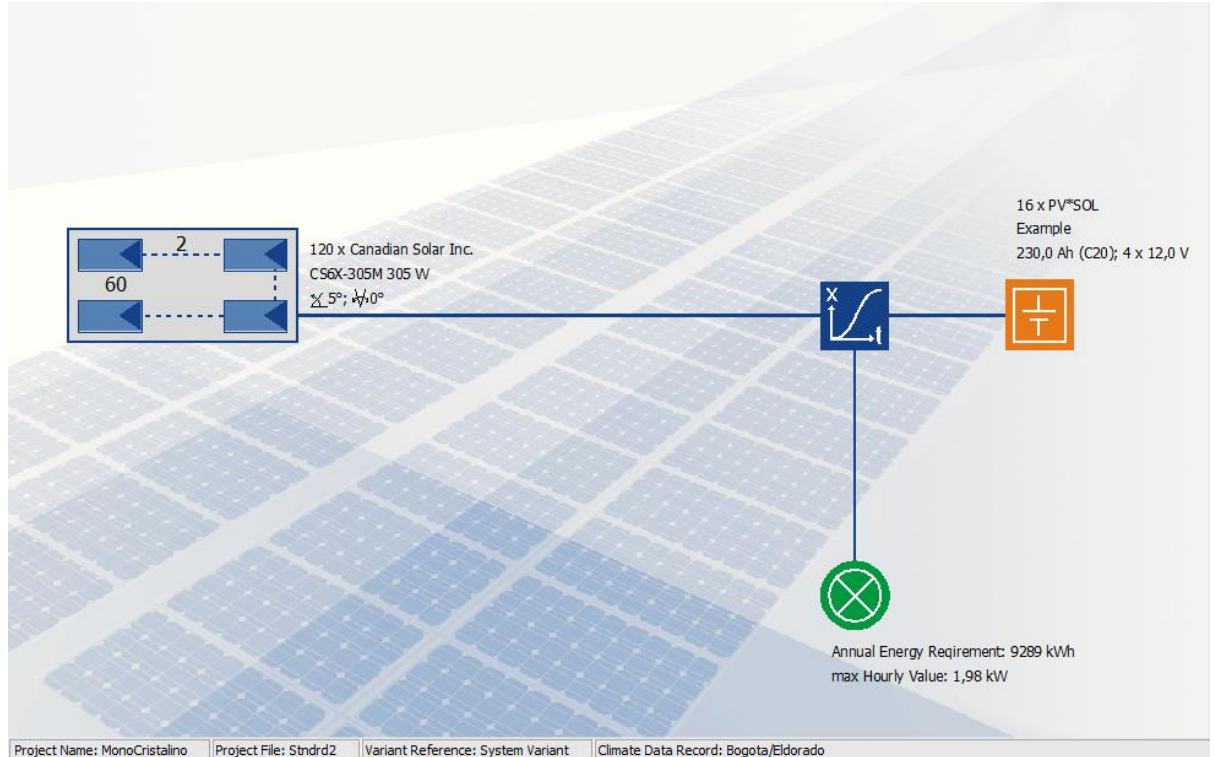
P_{max} , es la potencia nominal máxima del tipo de panel.

Entonces,

$$120 \text{ paneles} * 305W = 36.600 \text{ kW pico} \quad (2.15)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 25, con una producción total anual de 39.437 kWh.

Figura 26. Simulación de panel solar



En la Figura 26 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

2.3.3.2 Datos experimentales panel policristalino

Figura 27. Características del panel policristalino

The screenshot shows a software window titled "Module Characteristic Values" with a close button (X) in the top right corner. The window has four tabs: "Basic Data" (selected), "U/I Char. - STC", "U/I Char. - Part Load", and "Other Data". On the right side of the window, there are buttons for "Load", "Save As...", "Save", "Print", and "Close".

The "Basic Data" tab contains the following fields and options:

- Manufacturer: Canadian Solar Inc. (with a folder icon)
- Model: CS6X-305P
- Lower Output Tolerance [%]: 0,0
- Upper Output Tolerance [%]: 2,0
- Cell Type: Si Polycrystalline (dropdown menu)
- ☐ Only Suitable for Transformer Inverters
- Number of Cells: 72
- Number of Bypass Diodes: 3
- ☒ Cell Strings Perpendicular to Short Side (accompanied by a diagram of a panel with perpendicular strings)
- ☐ Cell Strings Parallel to Short Side (accompanied by a diagram of a panel with parallel strings)

At the bottom, there is a "Dimensions" section with the following fields:

- Width [mm]: 982
- Depth [mm]: 40
- Height [mm]: 1.954
- Frame Width [mm]: 35
- Gross Surface Area [m²]: 1,92

En la Figura 27 se observa los datos básicos de la configuración del panel poliocristalino, entre los cuales se encuentran: el modelo del panel, la tolerancia de salida, el tipo de celda, el número de celdas (células) y el número de diodos bypass y, la orientación del panel (paralelo o perpendicular).

Figura 28. Datos característicos de temperatura en el panel policristalino

Module Characteristic Values [X]

Basic Data | U/I Char. - STC | U/I Char. - Part Load | **Other Data**

Temperature Coefficient

Voltage Coefficient (Uoc) ☒ [mV/K] -152,32 ☐ [%/K] -0,3400

Electricity Coefficient (Isc) ☒ [mA/K] 5,83 ☐ [%/K] 0,0650

Output Coefficient [%/K] -0,430

Incident Angle Modifier [%] 95,0

Maximum System Voltage [V] 1.000,0

Data for Dynamic Temperature Model

Spec. Heat Capacity [J/(kg*K)] 920,0

Absorption Coefficient [%] 70,0

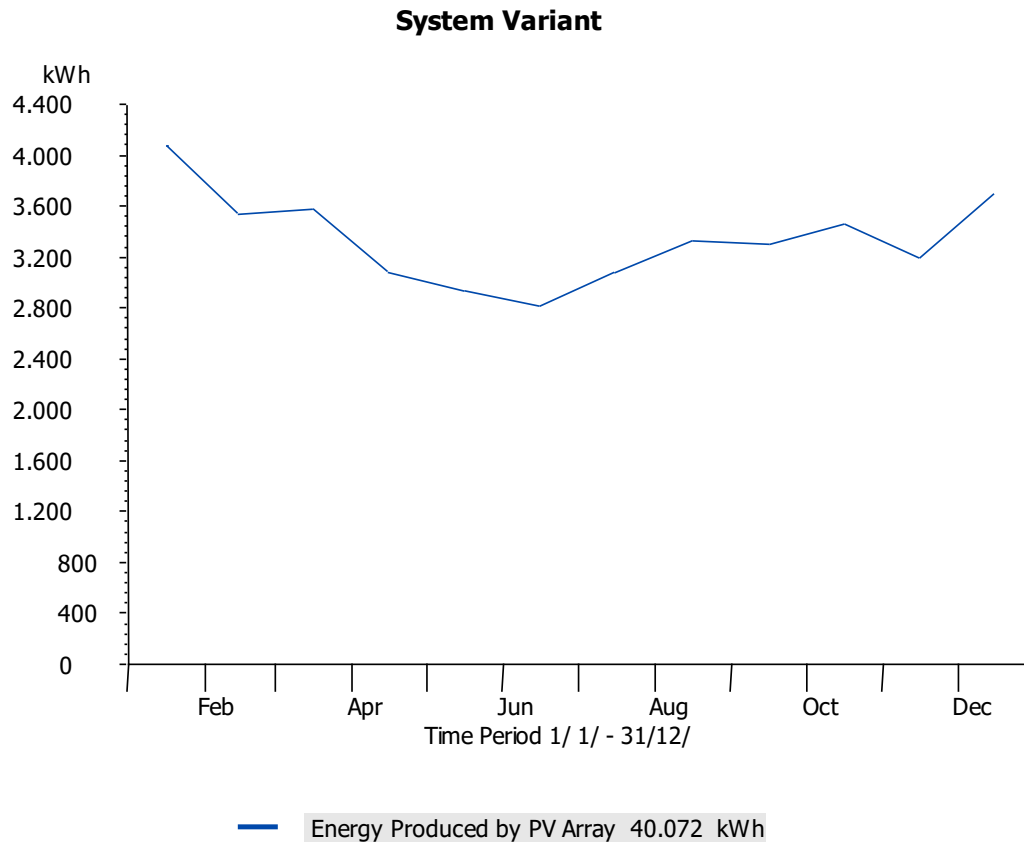
Emissions Coefficient [%] 85,0

Weight [kg] 27,00

Buttons: Load, Save As..., Save, Print, Close

En la Figura 28 se observan una serie de datos alternos del panel policristalino, de los cuales se resaltan los siguientes: coeficientes de voltaje y electricidad, coeficientes de emisión y absorción.

Figura 29. Energía eléctrica producida anualmente



Se realizó una simulación de 36.600 kW pico con un panel solar de tipo policristalino basado en las características presentes en las Figura 27 y Figura 28. Se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$120 \text{ paneles} * 305W = 36.600 \text{ kW pico} \quad (2.16)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 29, con una producción total anual de 40.072 kWh.

2.3.3.3 Datos experimentales panel cobre

Figura 30. Características del panel cobre

Module Characteristic Values

Basic Data | U/I Char. - STC | U/I Char. - Part Load | Other Data

Manufacturer: Evergreen Solar

Model: ES-E 220

Lower Output Tolerance [%]: 0,0

Upper Output Tolerance [%]: 2,0

Cell Type: ribbon

☐ Only Suitable for Transformer Inverters

Number of Cells: 120 | Number of Bypass Diodes: 3

☒ Cell Strings Perpendicular to Short Side | ☐ Cell Strings Parallel to Short Side

Dimensions

Width [mm]: 951 | Depth [mm]: 46

Height [mm]: 1.723 | Frame Width [mm]: 0

Gross Surface Area [m²]: 1,64

Buttons: Load, Save As..., Save, Print, Close

En la Figura 30 se observa los datos básicos de la configuración del panel de cobre, entre los cuales se encuentran: el modelo del panel, la tolerancia de salida, el tipo de celda, el número de celdas (células) y el número de diodos bypass y, la orientación del panel (paralelo o perpendicular).

Figura 31. Datos característicos de temperatura en el panel cobre

Module Characteristic Values

Basic Data | U/I Char. - STC | U/I Char. - Part Load | **Other Data**

Temperature Coefficient

Voltage Coefficient (Uoc) ☒ [mV/K] -111,29 ☐ [%/K] -0,3100

Electricity Coefficient (Isc) ☒ [mA/K] 4,11 ☐ [%/K] 0,0500

Output Coefficient [%/K] -0,430

Incident Angle Modifier [%] 95,0

Maximum System Voltage [V] 1.000,0

Data for Dynamic Temperature Model

Spec. Heat Capacity [J/(kg*K)] 920,0

Absorption Coefficient [%] 70,0

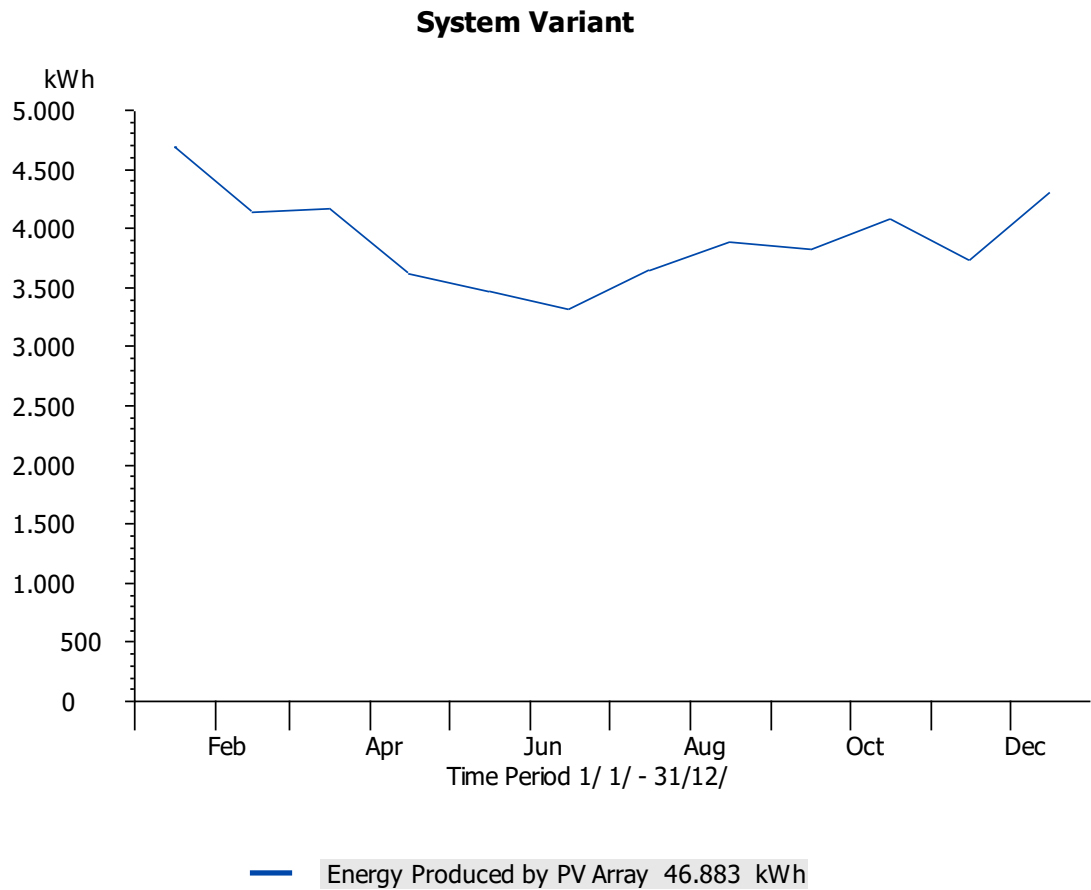
Emissions Coefficient [%] 85,0

Weight [kg] 19,50

Buttons: Load, Save As..., Save, Print, Close

En la Figura 31 se observan una serie de datos alternos del panel policristalino, de los cuales se resaltan los siguientes: coeficientes de voltaje y electricidad, coeficientes de emisión y absorción.

Figura 32. Energía eléctrica producida anualmente

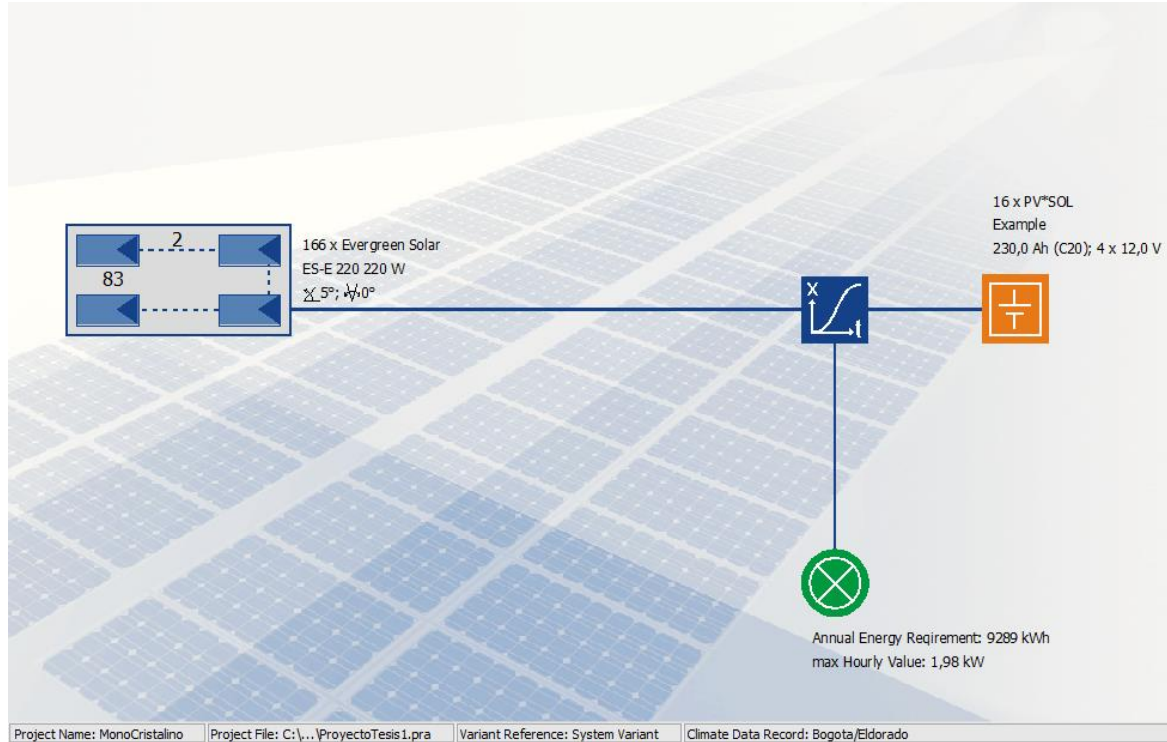


Se realizó una simulación de 36.520 kW pico con un panel solar de tipo ribbon basado en las características presentes en las Figura 30 y Figura 31. Se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$166 \text{ paneles} * 220W = 36.520 \text{ kW pico} \quad (2.17)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 32, con una producción total anual de 46.883 kWh.

Figura 33. Simulación de panel solar



En la Figura 33 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

2.4 ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ÁREA DE LAS TELECOMUNICACIONES

2.4.1 Repetidor de microondas *back to back*

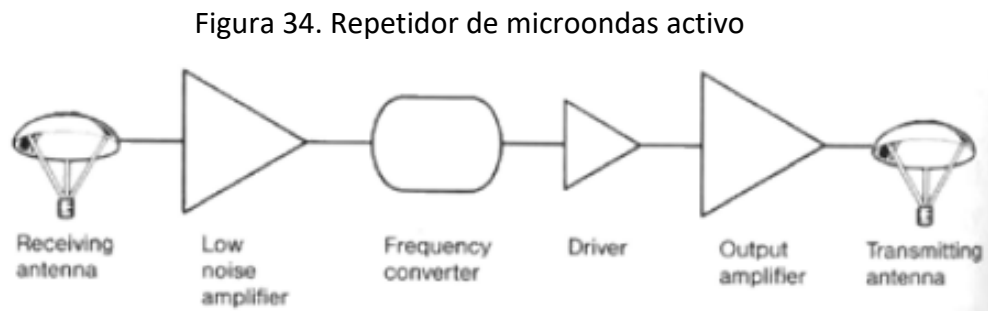
En redes de microondas terrestres donde se deben cubrir grandes distancias sobre terrenos montañosos y de difícil acceso, es necesario la instalación de sistemas de repetición o de relevo, que usan transceptores de radio espalda a espalda (*back to back*) para lograr la interconexión de los diferentes enlaces o saltos que evitan los obstáculos (montañas y curvatura terrestre) y así retransmitir las ondas que de otra forma no serían posibles.

Estos repetidores por estar en zonas alejadas deben tener sistemas de alimentación redundantes de mínimo mantenimiento, y por eso se hace necesario disponer y usar diferentes fuentes de energía para lograr una alta disponibilidad de los servicios que se

transportan por esas redes. Una de esas fuentes es la energía solar que a través del sistema de paneles solares provee la energía eléctrica necesaria para su alimentación⁴⁵.

La distancia que cubren los enlaces de microondas se puede incrementar según la cantidad de repetidoras que maneje, dado que estas son capaces de ampliar y re-direccionar la señal. Existen dos tipos de repetidores:

- Repetidor activo: Recibe la señal en la frecuencia de portadora y la baja a una frecuencia intermedia (FI) la cual amplifica y la retransmite en la frecuencia de salida, como se muestra a continuación en la Figura 34.



Fuente:

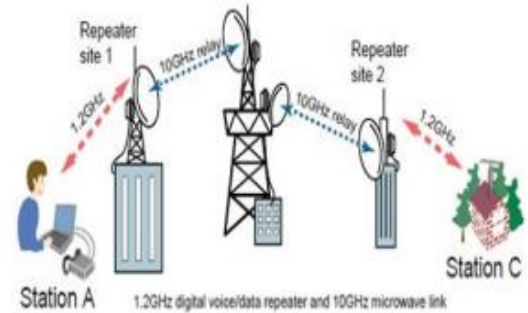
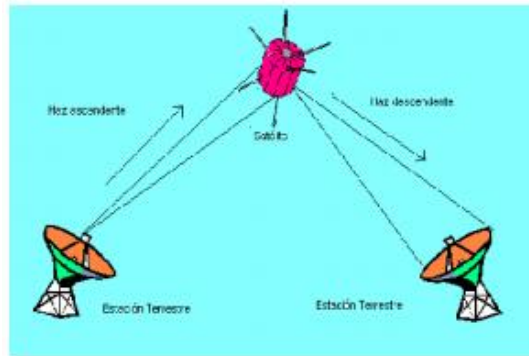
http://www.redtauros.com/Clases/Medios_Transmision/04_Radioenlaces_Terrestres_Microondas_.pdf
[Citado el: 10 de abril de 2017]

- Repetidor pasivo: Refleja la señal y es capaz de dividirse en pasivos convencionales, los cuales son “pastillas reflectoras” y los pasivos “back to back”, los cuales se conforman de dos antenas espalda con espalda como se muestra a continuación en la Figura 35⁴⁶.

⁴⁵ MOROCHO C., Paola. 2012. Re-diseño del arreglo de antenas "back to back" del radioenlace de microonda entre las estaciones de San Juan y Chiriboga, del S.O.T.E en la banda de 7GHz. Quito, Ecuador : s.n., Febrero de 2012. págs. 28-29.

⁴⁶ RADIO ENLACES TERRESTRES | MICROONDAS. 2010.

Figura 35. Repetidores de microondas pasivos



Fuente:

http://www.redtauros.com/Clases/Medios_Transmision/04_Radioenlaces_Terrestres_Microondas_.pdf
[Citado el: 10 de abril de 2017].

2.4.1.1 Ejemplo de simulación con una antena

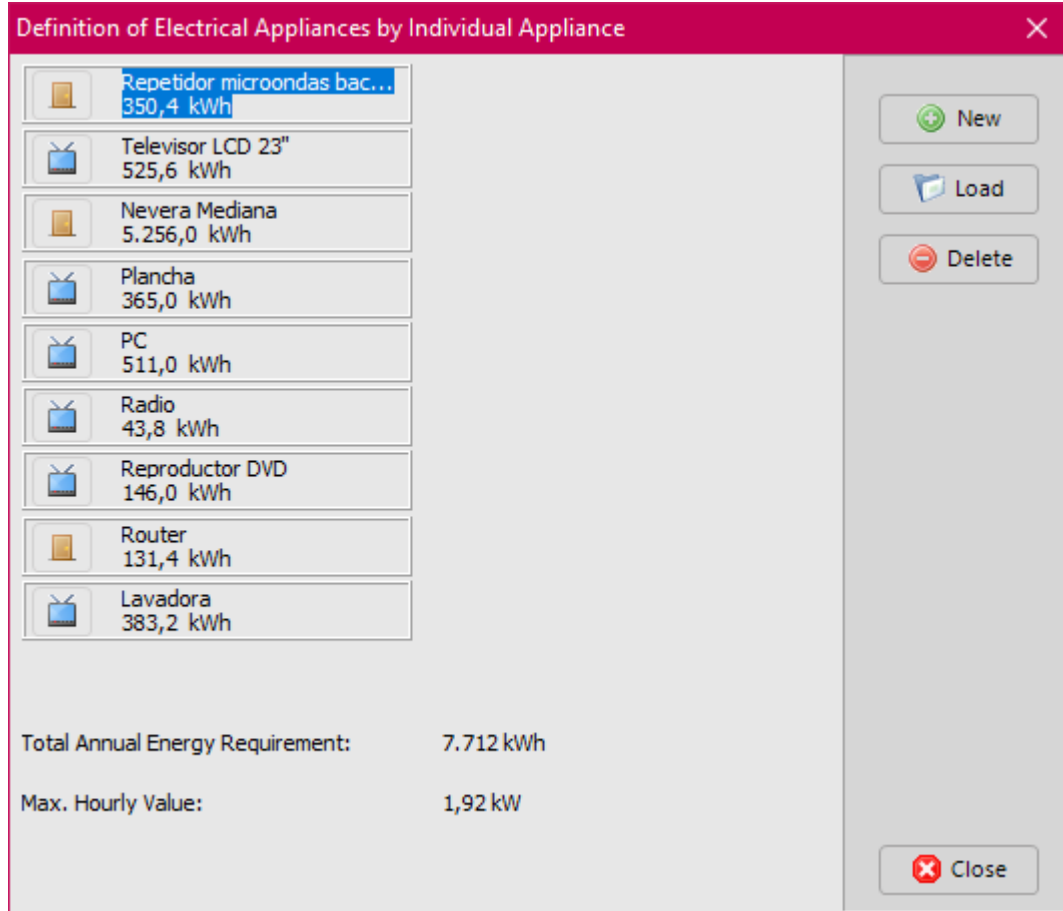
Para realizar la simulación de un repetidor microondas back to back, se utilizaron datos reales de consumo eléctrico promedio de un sistema de una antena:

Tabla 6. Datos uso eléctrico repetidor de microondas back to back con una antena

DATOS REPETIDOR DE MICROONDAS BACK TO BACK						
	ÍTEM	CANTIDAD	POTENCIA (W)	TOTAL POTENCIA (W)	CONSUMO (H)	ENERGIA TEORICA (WH)
1	Repetidor microondas back to back	1	40	40	24	960
2	Televisor LCD 23"	3	60	180	8	1440
3	Nevera Mediana	1	600	600	24	14400
4	Plancha	1	1000	1000	1	2000
5	PC	1	200	200	7	1400
6	Radio	1	30	30	4	120
7	Reproductor de DVD	1	200	200	2	400
8	Router	1	15	15	24	360
9	Lavadora	1	1050	1050	1	1050
	TOTAL			3315		22130

Fuente: Creación propia. Referenciado de: http://www.peninsulaengineering.com/pdfs/RF-15000_sum.pdf el 01 de junio de 2017.

Figura 36. Listado de aparatos eléctricos del simulador (una antenna)



En la Figura 36 se observa el listado final de los aparatos electrónicos proporcionados por los datos recolectados de la Tabla 6.

2.4.1.1.1 Datos experimentales panel monocristalino

Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Silicio Monocristalino que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 23 y la Figura 24.

Como resultado de esta, se simuló un sistema de 2,44 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$8 \text{ paneles} * 305W = 2,44 \text{ kW pico} \quad (2.18)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 37, con una producción total anual de 2,362 kWh.

Figura 37. Energía eléctrica producida anualmente

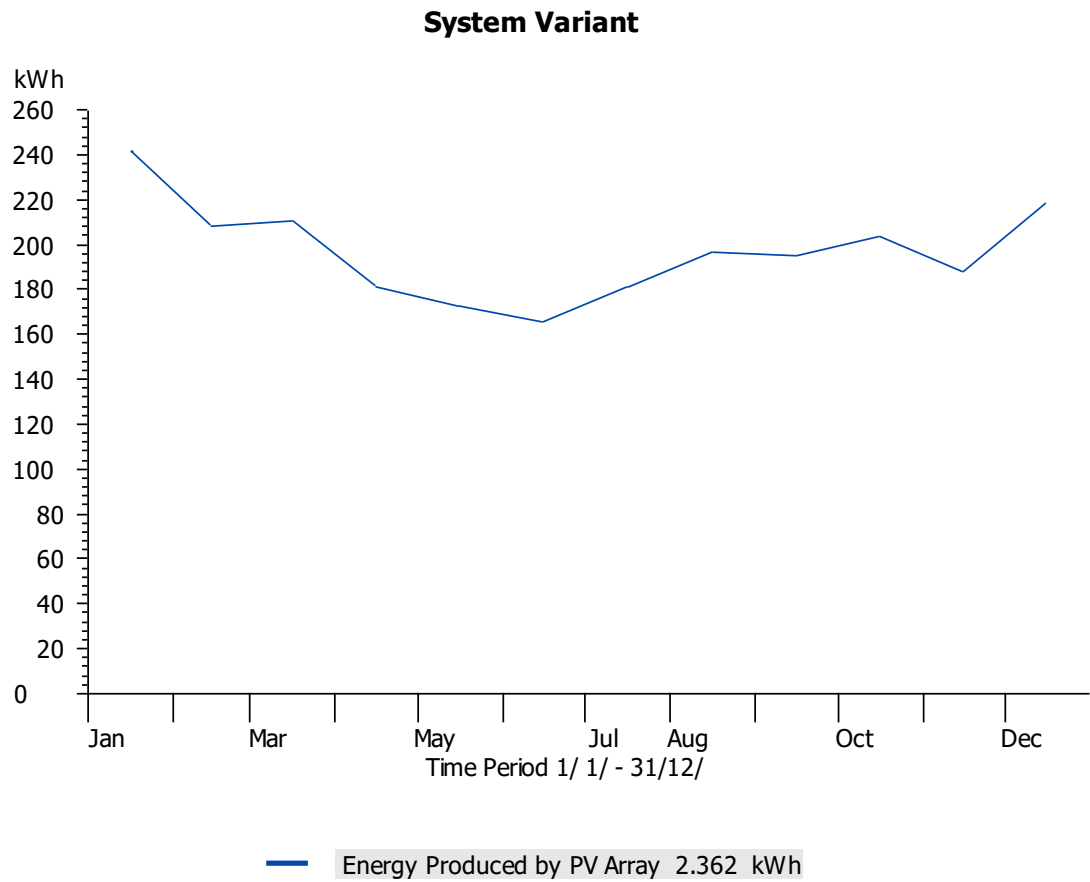
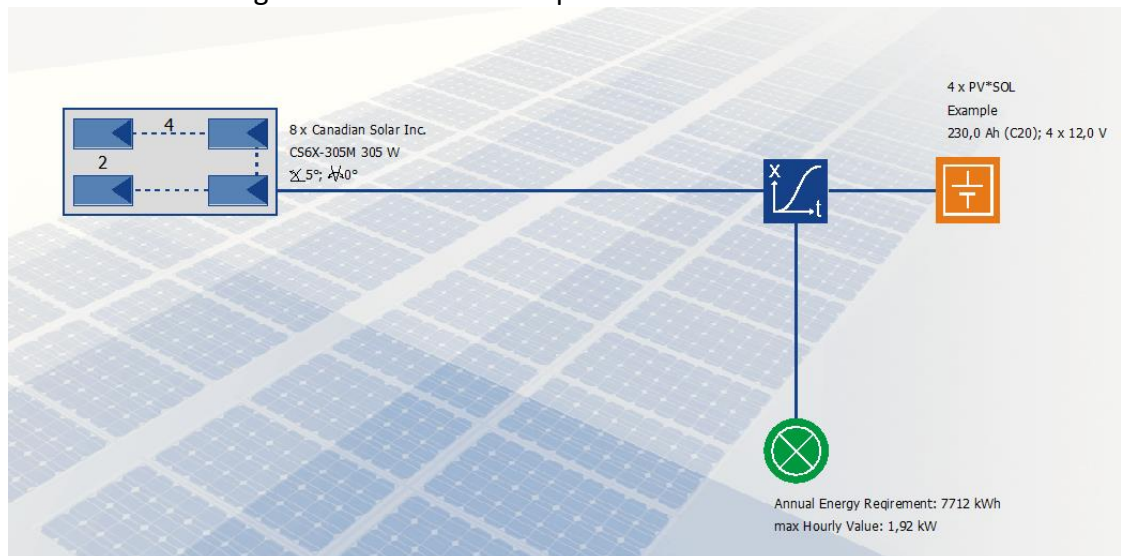


Figura 38. Simulación de panel solar monocristalino



En la Figura 38 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

2.4.1.1.2 Datos experimentales panel policristalino

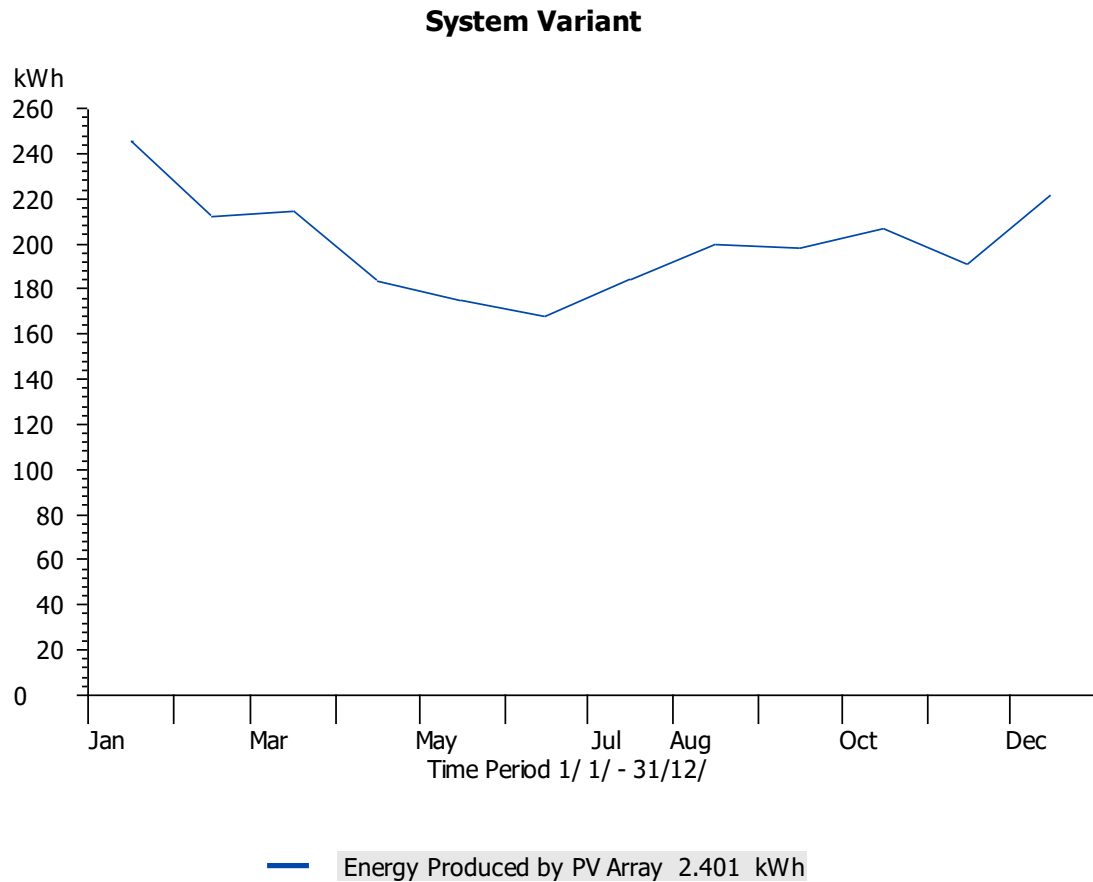
Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Silicio Policristalino que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 27 y la Figura 28.

Como resultado de esta, se simuló un sistema de 2,44 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$8 \text{ paneles} * 305W = 2,44 \text{ kW pico} \quad (2.19)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 39, con una producción total anual de 2,401 kWh.

Figura 39. Energía eléctrica producida anualmente



2.4.1.1.3 Datos experimentales panel de cobre

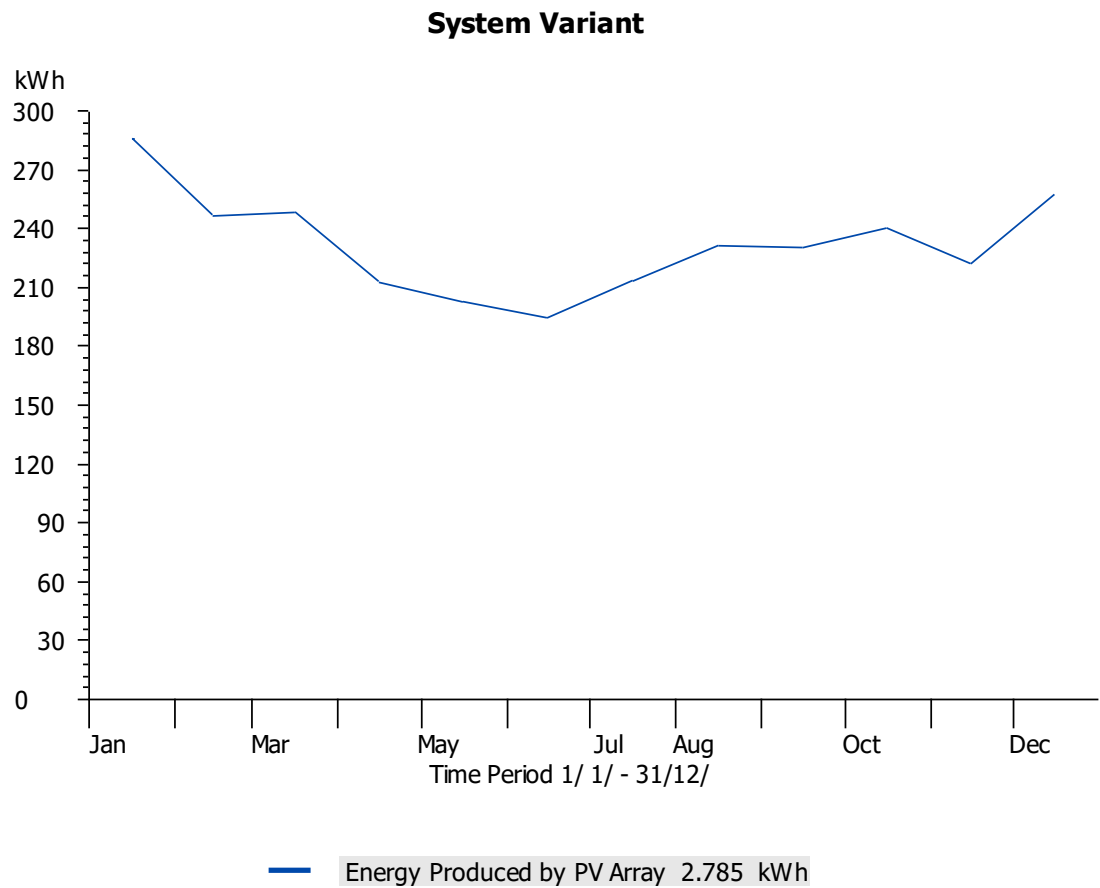
Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Cobre que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 30 y la Figura 31.

Como resultado esta 2,64 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$12 \text{ paneles} * 220W = 2,64 \text{ kW pico} \quad (2.20)$$

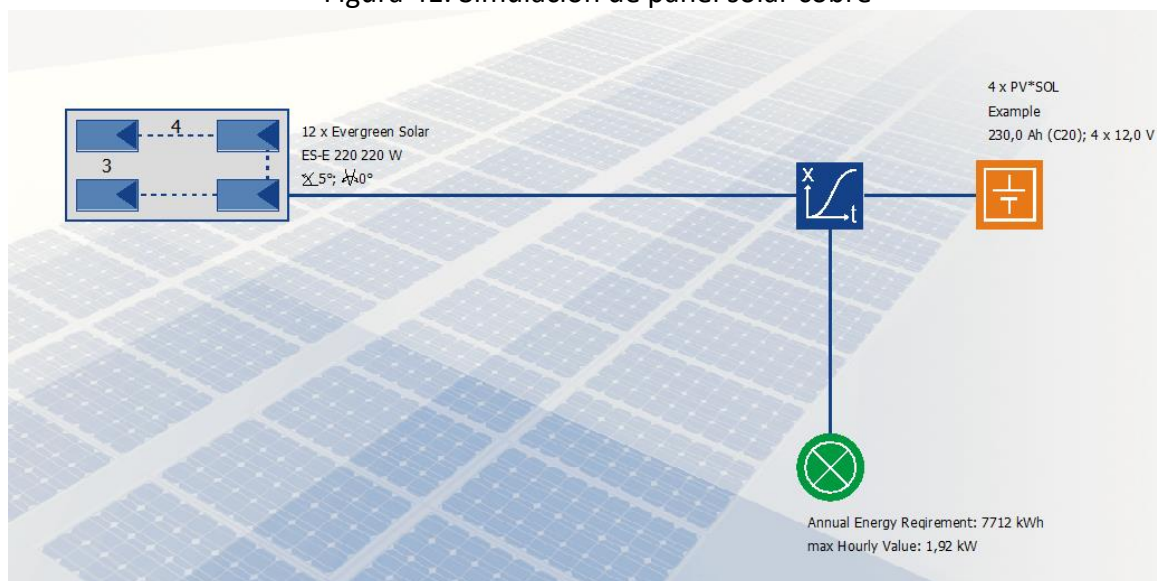
Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 40, con una producción total anual de 2,785 kWh.

Figura 40. Energía eléctrica producida anualmente



En la Figura 41 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

Figura 41. Simulación de panel solar cobre



2.4.1.2 Ejemplo de simulación con dos antenas

Para realizar la simulación de un repetidor microondas back to back, se utilizaron datos reales de consumo eléctrico promedio de un sistema para dos antenas:

Tabla 7. Datos uso eléctrico repetidor de microondas back to back con dos antenas

DATOS REPETIDOR DE MICROONDAS BACK TO BACK						
	ÍTEM	CANTIDAD	POTENCIA (W)	TOTAL POTENCIA (W)	CONSUMO (H)	ENERGIA TEORICA (WH)
1	Repetidor microondas back to back	2	40	80	24	1920
2	Televisor LCD 23"	3	60	180	8	1440
3	Nevera Mediana	1	600	600	24	14400
4	Plancha	1	1000	1000	1	2000
5	PC	1	200	200	7	1400
6	Radio	1	30	30	4	120
7	Reproductor de DVD	1	200	200	2	400
8	Router	1	15	15	24	360
9	Lavadora	1	1050	1050	1	1050
	TOTAL			3355		23090

Fuente: Creación propia. Referenciado de: http://www.peninsulaengineering.com/pdfs/RF-15000_sum.pdf el 01 de junio de 2017.

2.4.1.2.1 Datos experimentales panel monocristalino

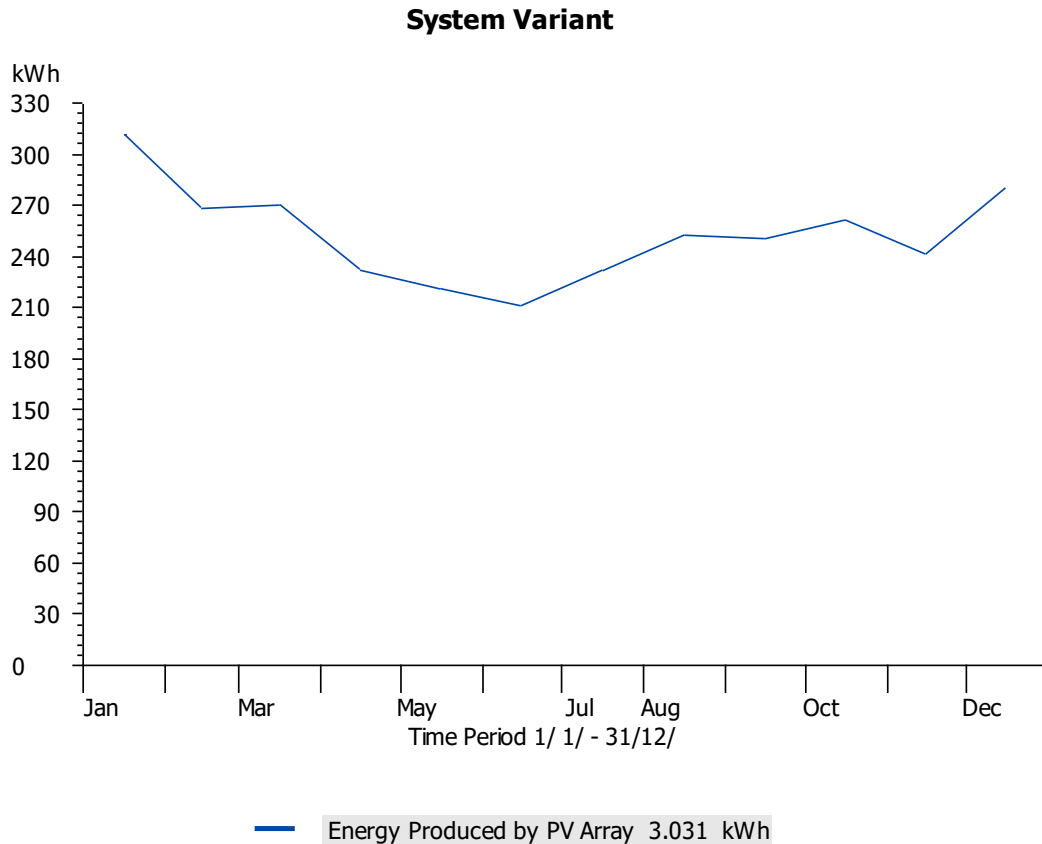
Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Silicio Monocristalino que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 23 y la Figura 24.

Como resultado de esta, se simuló un sistema de 3.050 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$10 \text{ paneles} * 305W = 3.050 \text{ kW pico} \quad (2.21)$$

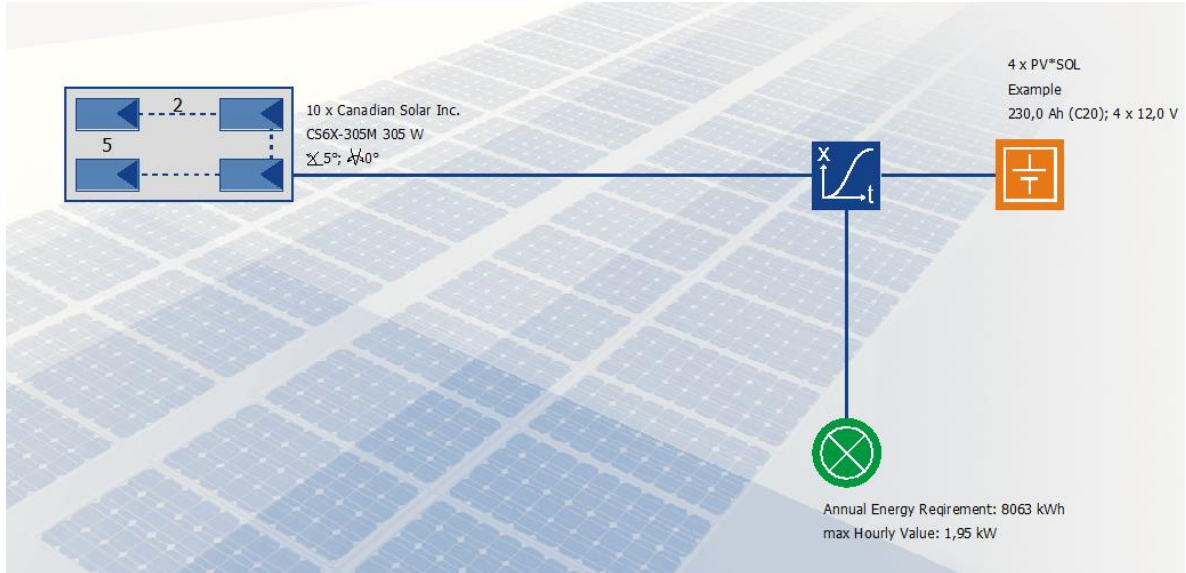
Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 42, con una producción total anual de 3.031 kWh.

Figura 42. Energía eléctrica producida anualmente



En la Figura 43 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

Figura 43. Simulación de panel solar monocristalino



2.4.1.2.2 Datos experimentales panel policristalino

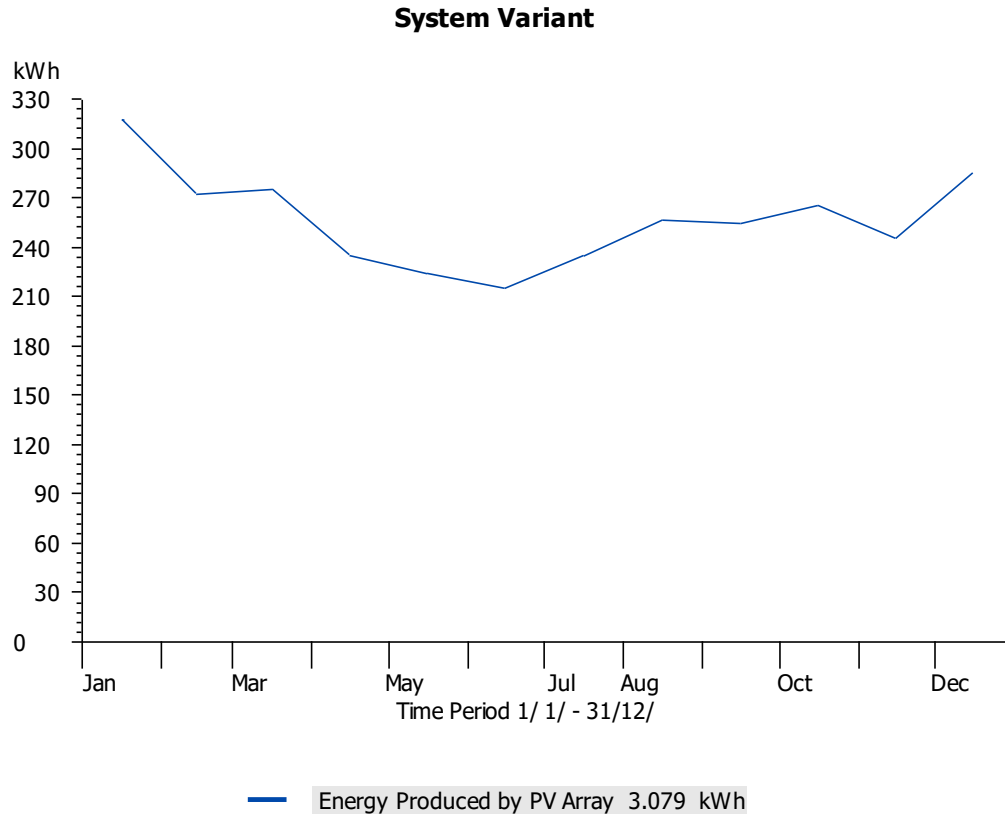
Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Silicio Policristalino que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 27 y la Figura 28.

Como resultado de esta, se simuló un sistema de 3.050 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$10 \text{ paneles} * 305W = 3.050 \text{ kW pico} \quad (2.22)$$

Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 44, con una producción total anual de 3.079 kWh.

Figura 44. Energía eléctrica producida anualmente



2.4.1.2.3 Datos experimentales panel de cobre

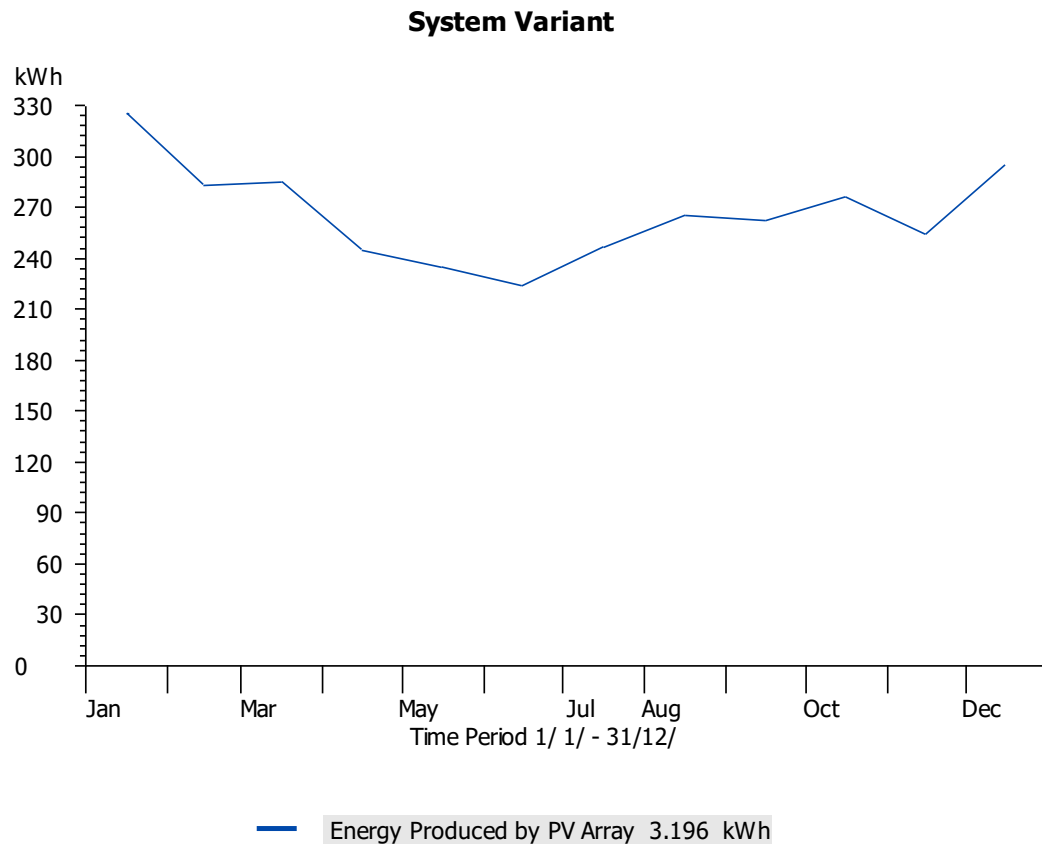
Para la simulación del repetidor de microondas se utilizó el mismo tipo de panel de Cobre que en la simulación de la casa estrato medio-alto, por tanto, se tomó la misma información de las características generales y de temperatura que las vistas en la Figura 30 y la Figura 31.

Como resultado esta 2,64 kW pico y se calculó el nivel de potencia (kW) de la siguiente manera:

$$12 \text{ paneles} * 220W = 2,64 \text{ kW pico} \quad (2.23)$$

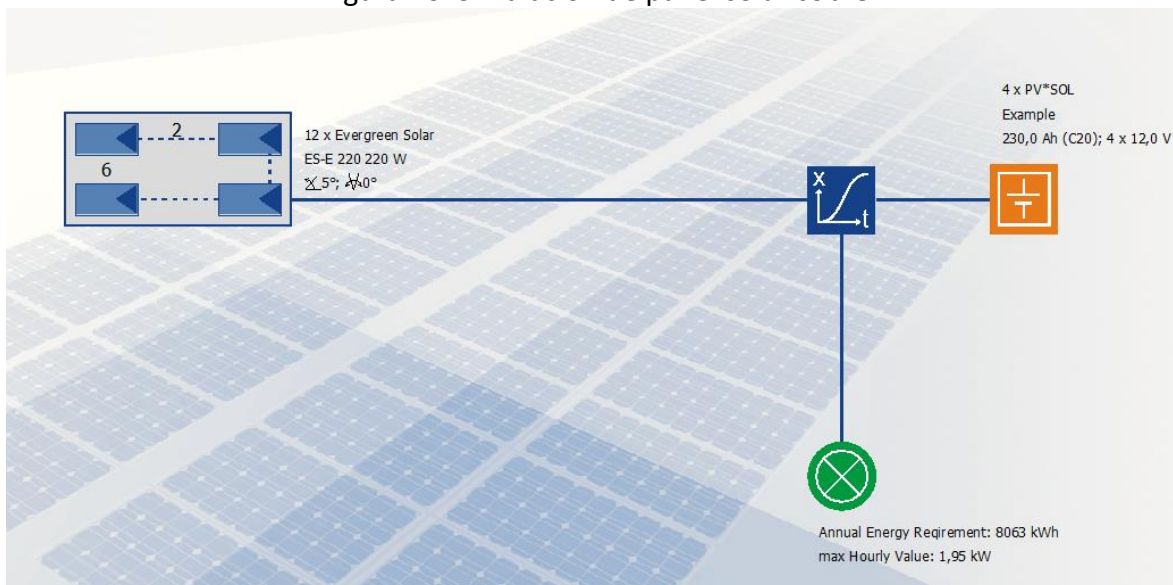
Con este sistema se logró obtener el resultado mostrado en la Figura 45, con una producción total anual de 3,197 kWh.

Figura 45. Energía eléctrica producida anualmente



En la Figura 46 se muestra la fase final del panel, con la cantidad de celdas en serie y paralelo junto con la cantidad de energía anual requerida y el máximo valor por hora (energía). Igualmente, menciona el tipo de panel utilizado en el diseño.

Figura 46. Simulación de panel solar cobre



2.4.2 Estaciones base BTS

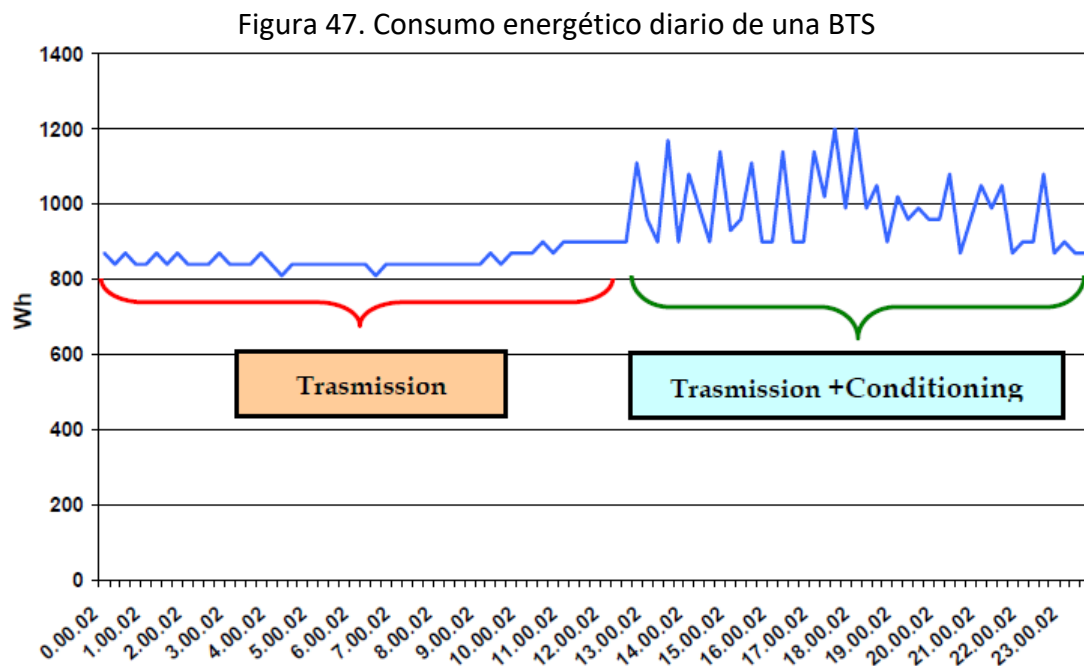
En referencia a las redes inalámbricas, se han propuesto múltiples estrategias relacionadas al ahorro de energía, entre las cuales están: las unidades de radios remotas, el radio modo de espera, eficiencia superior rectificadores, entre otras. Si son consideradas estas estrategias es posible tener un ahorro de energía superior al 58%. Esto se basa en que las estaciones base en su infraestructura se puede optimizar el acondicionamiento de aire lo cual reduce en un 3% el ahorro de energía.

De igual manera, una forma de reducir las emisiones de costes y CO₂ es la evaluación y desarrollo de intervenciones y soluciones técnicas, las cuales se basan en la producción de energía utilizada por los aparatos de radio-telecomunicación, a través del uso de energía renovable (células fotovoltaicas, turbinas eólicas o nuevas alternativas de células) instaladas en la infraestructura o siendo utilizadas fuera de la red de sistemas de energía de telecomunicaciones. Se han realizado estudios respecto al uso de fuentes alternativas de energía especialmente para lugares fuera del alcance de una red eléctrica, cuando el suministro eléctrico sea poco confiable o sitios lo suficientemente alejados para hacer el mantenimiento regular y reabastecimiento de combustible diésel son prohibitivos. La elección de alternativas, es decir, la fuente de energía, dependerá de las condiciones locales, la tipología BTS y el consumo de energía.

Se han desarrollado análisis estadísticos con relación al consumo energético BTS, de los cuales sobresalen dos posibles estrategias de intervención; primero, basándose en algoritmos "inteligentes" para la optimización y regulación dinámica de funciones de aire acondicionado; segundo, un local de refrigeración de equipos electrónicos individuales,

evitando la contaminación del entorno en el que se encuentran. Estas estrategias están basadas en que dentro de los parámetros termodinámicos (temperaturas, humedad, etc.) se asumen rangos de valores más elevados que en áreas frecuentadas por personas. Por lo tanto, tanto el uso de sistemas inteligentes de aire acondicionado como las tecnologías locales de enfriamiento son estrategias considerablemente útiles para el ahorro de energía del 5% al 10% de los consumos de aire acondicionado.

En relación a una BTS, lo más importante es una auditoria energética refiriéndose a la compensación de la gestión del sistema de telecomunicaciones inalámbrico de energía. Se han realizado una serie de mediciones haciendo uso de aparatos de radio-telecomunicación con empresas italianas de comunicaciones, las cuales cuentan con diferentes tecnologías, tipografías y cargas de trabajo. En la Figura 47 se muestra el consumo de energía diaria de un BTS, en la cual se distingue dos tendencias diferentes: valor de consumo de energía constante día/noche y una tendencia oscilante para las horas más cálidas.



Fuente: LUBRITTO, Carmine (2010). Telecommunication Power System: Energy Saving, Renewable Sources and Environmental Monitoring, Trends in Telecommunications Technologies, Christos J Bouras (Ed.) [Citado el: 10 de abril de 2017]

Ahora bien, en este sistema de telecomunicaciones se han implementado las tecnologías limpias sobre su infraestructura del BTS. Estas han sido pensadas para zonas rurales, en las cuales se tiene pensado implementar sistemas fotovoltaicos y diversas fuentes renovables para diferentes tipologías y aparatos externos a la red eléctrica. Según como

sea la instalación y fabricación de estos equipos se tendrá un estimado aproximado de energía producida en un 70% de capacidad⁴⁷.

3 CONCLUSIONES

Los nuevos materiales fotosensibles que fueron analizados durante la investigación permitirán la fabricación de paneles solares con un nivel de eficiencia mucho más elevado que el que se conoce actualmente. Al comparar los diferentes materiales fotovoltaicos se puede analizar que el panel tipo cobre genera 46,072 kWh al año con un sistema de 36.520 kW pico por lo cual, el panel solar tipo cobre genera una mayor cantidad de energía eléctrica mediante la absorción de energía solar en comparación con un panel monocristalino o policristalino. Esto se logra incrementando el número de celdas, esto teniendo en cuenta que el panel cobre.

Después del panel tipo cobre, el tipo de panel de mayor eficiencia es el policristalino, donde con un sistema de 36,600 kW pico se genera 40.072 kW pico, comparado con el tipo de panel monocristalino que con un sistema de 36.600 kW pico genera 39,437 kW pico.

Para continuar con el proyecto de investigación se plantea que el siguiente paso es realizar un estudio financiero con el fin de realizar un análisis de costo beneficio de los diferentes tipos de paneles.

La implementación de este sistema de energía renovable tendrá principalmente impacto ambiental ya que es un fuente de energía inagotable y de bajo impacto en contaminación, adicionalmente en su funcionamiento no genera sustancias nocivas en el ecosistema, contribuye a la economía de un país porque impulsa el ahorro de energía eléctrica. En segundo lugar, se puede complementar los aparatos de telecomunicaciones debido a que la energía eléctrica que producen normalmente se verá beneficiada con el uso de energía limpia.

Al realizar la comparación de los repetidores de microondas *back to back* para una y dos antenas, se pudo observar que el panel de cobre en ambos escenarios es de 12 paneles, sin embargo, la diferencia radica en que el panel en la simulación de una antena se crea con 4 paneles en serie y 3 en paralelo generando 2.785 kWh mientras que la simulación de dos antenas se crea con 2 paneles en serie y 6 en paralelo generando 3.196 kWh, a pesar del hecho de que ambos paneles hacen un sistema de 2,64 kW pico, el tener más paneles en paralelo genera una mayor conductividad de energía eléctrica.

⁴⁷ LUBRITTO, Carmine (2010). Telecommunication Power System: Energy Saving, Renewable Sources and Environmental Monitoring, Trends in Telecommunications Technologies, Christos J Bouras (Ed.), ISBN: 978-953-307-072-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunicationstechnologies/telecommunication-power-system-energy-saving-renewable-sources-and-environmentalmonitoring>

BIBLIOGRAFÍA

ABAL, Gonzalo. *Fundamentos de Energía Solar RADIACIÓN SOLAR*. págs. 3,4.

A. J. Cuervo, "Propiedades estructurales y espectroscopia de impedancia del estanoato tipo perovskita," Bogotá, 2011.

Definición ABC. [En línea] 2009. [Citado el: 07 de Julio de 2016.] <http://www.definicionabc.com/ciencia/conductividad.php>.

Energía Solar Fotovoltaica. 2009.

RADIO ENLACES TERRESTRES | MICROONDAS. 2010.

A. Morales A., "Límites para la máxima eficiencia de celdas solares de silicio: efectos debidos a la generación Auger y a niveles profundos," *Revista Mexicana de Física*, pp. 449-458, 1996.

Parametros físico-químicos: Conductividad. Puerto Rico : Recinto Universitario de Mayagüez.

AUREUM, Miliarium. 2004. Miliarium. Índice de toxicidad. [En línea] 2004. [Citado el: 17 de Febrero de 2017.] <http://www.miliarium.com/prontuario/indices/IndicesToxicidad.htm>.

BV, L. (2009). Lenntech. Recuperado el 03 de Mayo de 2016, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm>

CIDET. 2012. *Celdas de Grätzel*. Medellín : s.n., 2012.

CORTES I., María de Lourdes. 2009. Academia de bioinstrumentación. México: s.n., 2009.

DIXON. 2005. Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida. Chile: s.n., 2005, págs. 7-10.

Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde la ciencia de la tierra. Caballero, Margarita, Lozano, Socorro y Ortega, Beatriz. 2007. 10, México: s.n., 2007, Vol. 8.

El cobre, cobre puro. Generalidades sobre el cobre y sus usos. 2.

ENERGIASOLAR.MX. 2009. Uso de nanotecnología promete aumentar la eficiencia en Celdas Solares. *Energía Solar*. [En línea] 2009. <http://www.energiasolar.mx/desarrollo-tecnologico/uso-nanotecnologia-promete-aumentar-eficiencia-celdas-solares.html>.

Energía geotérmica. Energías renovables. [En línea] [Citado el: 20 de Enero de 2016.] https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf.

FERMOSELL, Ruth. 2013. Avanza la investigación en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, llegando a alcanzar un 43% de eficiencia. Madrid: s.n., 2013.

FULLER, Dawn. 2014. UC Researchers Report on Discovery to Make Solar Power Less Expensive and More Efficient. UC News. 2014.

G. Ferro, E. Lentini and C. Romero, "Eficiencia y su medición en prestadores de servicios de agua potable y alcantarillado," Febrero 2011. [Online]. Available: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/42728/lcw385e.pdf>.

LUBRITTO, Carmine (2010). Telecommunication Power System: Energy Saving, Renewable Sources and Environmental Monitoring, Trends in Telecommunications Technologies, Christos J Bouras (Ed.), ISBN: 978-953-307-072-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunicationstechnologies/telecommunication-power-system-energy-saving-renewable-sources-and-environmentalmonitoring>

MARTIN, N. S. 2000. Células Solares de plástico: Un reto para los nuevos materiales orgánicos del siglo XXI. España: Anales de la Real Academia Española de Química., 2000, págs. 5-11.

MERCADO, S.A. 2007. El medio ambiente, geotermia y toma de conciencia. 2007, pág. 77.

MIRANDA M., Daniel A. 2009. Breve Descripción de las Celdas Fotovoltaicas de Mono Unión y de Banda Intermedia. Universidad Industrial de Santander. [En línea] 23 de Noviembre de 2009. http://ciencias.uis.edu.co/fisica/sites/default/files/blog/archivos/La%20celda%20fotovoltaica_v1.1.pdf.

MOROCHO C., Paola. 2012. Re-diseño del arreglo de antenas "back to back" del radioenlace de microonda entre las estaciones de San Juan y Chiriboga, del S.O.T.E en la banda de 7GHz. Quito, Ecuador: s.n., Febrero de 2012. págs. 28-29.

MOYA, Pedro. 2015. Paneles Solares. Crean un recubrimiento transparente que aumenta la eficiencia de los paneles solares. [En línea] 22 de Septiembre de 2015. [Citado el: 08 de Octubre de 2016.] <http://www.omicrono.com/2015/09/crean-un-recubrimiento-transparente-que-aumenta-la-eficiencia-de-los-paneles-solares/>

Nanotecnología para la energía fotovoltaica. Hernández, J.C, Rimada, M. Courel y Cabrera, C.I. 2013. México: s.n., 2013.

NORDBERG, Gunnar. Metales: Propiedades químicas y toxicidad. *Productos químicos*.

PEREDA, Isidro E. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Santiago, Chile: s.n., 2005.

PLÁ, J., Y OTROS. 2007. Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales III-V. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina: s.n., 2007, págs. 04-85.

Placas solares de perovskita. SIVARAM, Varum. 2015. 2015, Investigación y Ciencia.

RENOM, Madeleine. 2011. Radiación. Principios básicos de mediciones atmosféricas. 2011.

RESTREPO A., Luis Antonio. 2007. *La Energía Hidroeléctrica*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Medellín: s.n., 2007

ROA R., J. 2008. Propiedades y aplicaciones de nuevos materiales de tipo perovskita.

RODRÍGUEZ, G. C. (2008). Propiedades y aplicaciones del Grafeno. México. UANL.

SANTAMARTA, J. 2006. Las Energías Renovables son el Futuro. [En línea] 2006. <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/511.pdf>.

SCHALLENBERG, Julieta C. 2008. *Energías renovables y eficiencia energética*. S.l.: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008.

SEAS. 2012. BlogSEAS. [En línea] 22 de Octubre de 2012. [Citado el: 28 de Agosto de 2016.] <http://www.seas.es/blog/automatizacion/el-grafeno-propiedades-caracteristicas-y-aplicaciones/>.

SIRLIN, Eli. 2005. Diseño de Iluminación. Física de la Luz. [En línea] 2005. [Citado el: 16 de Junio de 2016.] http://www.elisirlin.com.ar/11_fisica%20de%20la%20luz.pdf.

SOLAR, M. 2010. Energía Solar Fotovoltaica. Reciclaje Paneles Solares. [En línea] 1 de Abril de 2010. <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/comienza-el-reciclaje-de-paneles-solares-en-europ/>.

Structural Optimization of Photonic Crystals for Enhancing Optical Absorption of Thin Film Silicon Solar Cell Structures. Yosuke, Kawamoto, Yoshinori, Tanaka y Kenji, Ishizaki. 2014. 1, s.l.: IEEE, 2014, Vol. 6.

T. G. Erika and A. Gutarra, "Aplicaciones electro-crómicas y foto-catalíticas del dióxido de titanio," 2004

TORRES, Isaac. 2012. Científicos del Cinvestav crean las celdas solares más eficientes en AL. Crónica. 2012.

VALLEJO, William A. 2011. Desarrollo de materiales fotovoltaicos usados como ventana óptica en celdas solares. Bogotá: s.n., 2011. Tesis doctoral.

W. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Segunda ed., México: Mc Graw Hill, 1993.